



Vergleich der Eignung von bewachsenen Boden- und Sandfiltern zur Reinigung von Strassenabwasser

Comparaison de l'efficacité des filtres en terre et des filtres à sable pour le traitement des eaux de ruissellement routier

Comparison of different vegetated soil and sand filters for treatment of road runoff

GEOTEST AG
Adalbert Pazeller
Christoph von Känel

wst 21
Michele Steiner

ilu AG
Felix Rutz

ZHAW
Beatrice Kulli Honauer

Forschungsprojekt VSS 2011/204 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Dezember 2017

1623

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Vergleich der Eignung von bewach- senen Boden- und Sandfiltern zur Reinigung von Strassenabwasser

**Comparaison de l'efficacité des filtres en terre et des filtres
à sable pour le traitement des eaux de ruissellement routier**

**Comparison of different vegetated soil and sand filters for
treatment of road runoff**

GEOTEST AG
Adalbert Pazeller
Christoph von Känel

wst 21
Michele Steiner

ilu AG
Felix Rutz

ZHAW
Beatrice Kulli Honauer

**Forschungsprojekt VSS 2011/204 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Dezember 2017

1623

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Adalbert Pazeller, GEOTEST AG

Mitglieder

Christoph von Känel, GEOTEST AG (Filteraufbau, Schadstoffprofile, Koreferat)

Beatrice Kulli Honauer, ZHAW (Hydraulik, Schadstoffprofile)

Michele Steiner, wst 21 (Reinigungsleistung, Hydraulik)

Felix Rutz, ilu AG (Bepflanzung, Betrieb und Unterhalt, Kosten)

Federführende Fachkommission

Fachkommission 2: Projektierung

Begleitkommission

Präsident

Prof. Dr. Rainer Schulin, Inst. f. Terrestrische Oekosysteme, ETH Zürich

Mitglieder

Christoph Abegg, Kanton Zürich, TBA

Markus Boller, Prof. Dr. Sc. Techn., dipl. Ing. ETH

Paul Burch, ASTRA Zofingen

Christian Krismer, Kanton Zürich, TBA / GE VII – Nationalstrassenunterhalt

Sébastien Lehmann, Sektion Oberflächengewässer Qualität, BAFU

Elmar Scheiwiller, AWA / Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern

Michele Steiner, Präsident VSS FNK 2.7

Markus Krüttli, Gewässerschutzinspektor AWEL (bis 2016)

Peter Wolfensberger, Gewässerschutzinspektor AWEL

Roman Zbinden, ASTRA Zofingen (bis 2016)

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	3
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
2 Ziel, Datengrundlage und Systemabgrenzung	15
2.1 Ziel	15
2.2 Datengrundlage	15
2.3 Systemabgrenzung	16
3 Übersicht: Filtertypen und Substrate	17
3.1 Bau- und Betriebsweise von Retentionsfilterbecken	17
3.2 Filtertypen	17
3.2.1 Bodenfilter mit Ober- und Unterboden	18
3.2.2 Bodenfilter mit Oberboden über Kiessand	19
3.2.3 Sandfilter	20
3.3 Filtersubstrate	21
3.3.1 Allgemeine Anforderungen	21
3.3.2 Filtersubstrat Boden	22
3.3.3 Filtersubstrat Sand	23
3.3.4 Filtersubstrat Kiessand	24
3.3.5 Aufbereiteten und Mischen von Substraten	25
4 Verhalten der Schadstoffe im Filter	27
4.1 Partikel und Schadstoffe im Strassenabwasser	27
4.1.1 Partikel	27
4.1.2 Schwermetalle	28
4.1.3 Organische Schadstoffe	29
4.1.4 Phasenverteilung der Schadstoffe	29
4.2 Prozesse in Boden- und Sandfiltern	29
4.3 Methoden der Filteruntersuchungen	31
4.4 Schadstoffprofil im Bodenfilter	32
4.5 Schadstoffprofil im Sandfilter	33
4.5.1 Verlagerung von Partikeln und Ausdifferenzierung von Schichten	33
4.5.2 Bedeutung der Sedimentauflage	35
4.5.3 Veränderung der Invasionszone	36
4.5.4 Sandschicht unterhalb der Invasionszone	36
4.5.5 Adsorption von gelösten Stoffen im Sand	36
4.5.6 pH-Wert und Kalk	37
4.6 Typische Unterschiede in der Verlagerung der Schadstoffe	38
4.6.1 Vergleich der Tiefenprofile bei Boden- und Sandfiltern	38
4.6.2 Ergebnisse der XRF-Messungen	38
4.6.3 Detailuntersuchungen am Standort Ellenwis	40
4.7 Funktionsstörungen der Filter	42
4.7.1 Kolmatieren der Oberfläche	42
4.7.2 Kolmatieren tieferer Schichten	43
4.8 Erkenntnisse	43
5 Hydraulik I: Tracerversuche und präferenzierter Fluss	45
5.1 Präferenzierter Fluss	45
5.2 Methoden der Feldversuche	46

5.3	Untersuchungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit von Boden- und Sandfiltern	47
5.4	Effekt des präferenziellen Flusses in Boden und Sandfiltern	48
5.4.1	Unterschiede zwischen Boden- und Sandfiltern	48
5.4.2	Einfluss des Alters der Anlagen auf die Fließmuster	49
5.5	Erkenntnisse	52
6	Hydraulik II: Hydraulische Leistung von Anlagen	53
6.1	Übersicht	53
6.2	Vergleich der spezifischen Durchflüsse der SABA-Typen	53
6.3	Kolmation	56
6.4	Erkenntnisse	57
7	Reinigungsleistung	59
7.1	Übersicht	59
7.2	Schadstoffentfernung: Konzentrationen	59
7.2.1	Zulaufkonzentrationen	59
7.2.2	Ablaufkonzentrationen	60
7.3	Schadstoffentfernung: Wirkungsgrade	63
7.4	Erkenntnisse	64
8	Betrieb, Unterhalt und Kosten	65
8.1	Anlagen und Methoden	65
8.2	Betriebserfahrungen	66
8.3	Notwendige Massnahmen	67
8.4	Betriebsdauer	68
8.5	Funktionskontrollen	69
8.6	Kosten	69
8.6.1	Investitionskosten	69
8.6.2	Betriebskosten	69
9	Diskussion und Empfehlungen	71
9.1	Sandfilter sind zu bevorzugen	71
9.2	Vorbehalte bei Bodenfiltern	71
9.3	Absetzbecken	72
9.4	Verminderung des präferenziellen Flusses bei Bodenfiltern	72
9.5	Kontrollmessungen	72
	Anhänge	73
	Glossar	93
	Literaturverzeichnis	95
	Projektabschluss	99
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	103

Zusammenfassung

Die ersten Erfahrungen mit Bodenfiltern in Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA) zeigten, dass diese Nachteile wie schlechte Durchlässigkeit, Neigung zur Kolmation oder ungenügende Reinigungsleistung aufwiesen. Das Hauptargument gegen Bodenfilter war der präferenzielle Fluss in der Bodenschicht. Von bepflanzten Sandfiltern hingegen erwartete man sich Vorteile wie geringen Platzbedarf, gute hydraulische Leistung bei gleichzeitig genügender Reinigungsleistung und vereinfachtem Unterhalt. Sandfilter standen aber auch im Verdacht, die Schadstoffe im Vergleich zu Bodenfiltern weniger gut zurückzuhalten und wurden deshalb bisher nicht für die Kategorie "erhöhte Anforderungen" vorgeschlagen. Es gab jedoch in der Literatur Hinweise, nach denen bepflanzte Sandfilter den Bodenfiltern in der Reinigungsleistung überlegen sein könnten.

Ziel der Arbeiten war, die bestehenden Unsicherheiten auszuräumen und Boden- und Sandfilter in ihrer hydraulischen Leistung, Reinigungsleistung sowie den Kosten für Betrieb und Unterhalt zu vergleichen. Dazu wurden die Ergebnisse von Funktionskontrollen an 20 Anlagen (12 Bodenfilter, 8 Sandfilter) ausgewertet. Für die Auswertung der Investitions- und Betriebskosten standen die Angaben von 49 Anlagen (31 Bodenfilter, 18 Sandfilter) zur Verfügung.

Die Untersuchungen anhand von Aufgrabungen in den Filtern zeigten, dass die Partikel aus dem Strassenabwasser mit den adsorbierten Schadstoffen in den Filterschichten zurückgehalten werden. Im Vergleich zum Boden zeigte der Sand eine deutlich bessere Filterwirkung, indem der weitaus grösste Teil der Partikel und Schadstoffe entweder in einer Sedimentauflage an der Oberfläche oder in den obersten cm der Sandschicht als deutlich erkennbare Invasionszone zurückgehalten wird. Analysen von Boden- und Sandproben, Messungen der Leitfähigkeit in den RFB und Färbeversuche mit einem Farbtracer ergaben, dass im Bodenfilter die Stoffe durch präferenziellen Fluss im Vergleich zum Sandfilter schneller und in grössere Tiefen verlagert werden. Die mechanische Filterung ist im Sand effektiver als im Boden. Auch die Möglichkeit der Adsorption gelöster Stoffe an Tonminerale in Bodenfiltern bietet keine zusätzlichen Vorteile.

Der spezifische hydraulische Durchfluss von Sandfiltern ist im Vergleich zu Bodenfiltern im Mittel um das Vierfache höher. Sandfilter haben demnach eine deutlich höhere hydraulische Leistung und beanspruchen daher auch weniger Fläche als Bodenfilter.

Die Ablaufkonzentrationen von GUS und Kupfer sind bei Boden- und Sandfiltern ungefähr gleich, während sie für Zink bei Sandfiltern um mindestens eine Leistungsklasse besser als bei Bodenfiltern sind. Sandfilter zeigen somit eine mindestens gleich hohe und zudem stabilere Schadstoffentfernung als Bodenfilter, und dies trotz höherer hydraulischer Leistung.

Die Auswertung von Daten aus dem SABA Kataster (MISTRA SABA) zu den Investitionskosten pro SABA ergab eine grosse Spannweite von ca. CHF 100'000 bis ca. CHF 600'000 pro Hektare entwässerter Strassenfläche (Bodenfilter: CHF 230'000, Sandfilter: CHF 180'000, Medianwerte). Die erfassten Angaben zu den mittleren jährlichen Betriebskosten pro Hektare entwässerter Strassenfläche zeigen Werte für SABA mit Bodenfilter von ca. CHF 3'000 und für SABA mit Sandfilter von ca. CHF 2'000. Der Unterhalt von Sandfiltern ist wesentlich einfacher, da diese nicht wie Bodenfilter jährlich gemäht werden müssen und kein Schnittgut zu entsorgen ist. Zudem sind die spezifischen Filterflächen pro Hektare entwässerter Strassenfläche bei den ausgewerteten Bodenfiltern grösser als bei den Sandfiltern (Bodenfilter: ca. 300 m², Sandfilter: ca. 200 m², Mittelwerte).

Sandfilter sind demnach den Bodenfiltern vorzuziehen. Sie weisen eine mindestens gleich hohe Reinigungsleistung wie Bodenfilter auf, und das bei deutlich besserer hydraulischer Leistung. Sie sind günstiger im Bau und einfacher im Unterhalt.

Résumé

Les premières expériences d'utilisation de filtres en terre dans des installations de traitement des eaux de ruissellement routier ont montré que ces installations présentaient des défauts tels qu'une faible perméabilité, une tendance au colmatage ou un effet épurateur insuffisant. L'argument principal contre les filtres en terre était la présence d'écoulements préférentiels au sein de la couche de sol.

En revanche, on attendait des filtres à sable végétalisés des avantages comme un moins grand besoin de place et de bonnes performances hydrauliques conjugués à un pouvoir d'épuration suffisant et à un entretien réduit. Les filtres à sable étaient cependant aussi soupçonnés de moins bien retenir les substances polluantes que les filtres en terre et n'ont en conséquence pas été proposés pour la catégorie "exigence élevée". On trouve toutefois dans la littérature des indications selon lesquelles les filtres à sable végétalisés pourraient être envisagés en lieu et place des filtres en terre.

Le but de l'étude était d'éliminer les incertitudes en présence et de comparer les filtres en terre et les filtres à sable selon leur capacité hydraulique, leur efficacité d'épuration ainsi que sur le coût d'exploitation et d'entretien. Dans ce but, les résultats des contrôles opérationnels provenant de 20 installations (12 filtres en terre, 8 filtres à sable) ont été exploités. 49 installations (31 filtres en terre et 18 filtres à sable; MISTRA SABA) étaient à disposition pour l'évaluation des coûts d'investissement et d'exploitation.

Des excavations dans les filtres ont permis de montrer que les particules contenues dans les eaux des routes sont retenues avec les polluants adsorbés dans les couches du filtre. Comparé au sol, le sable montre une action filtrante nettement meilleure en ce sens que la plus grande partie des particules et des contaminants est retenue à la surface ou dans les premiers centimètres de la couche de sable sous la forme d'une "zone d'invasion" nettement reconnaissable. Des analyses du sable et du sol, des mesures de la conductivité et des essais de coloration ont démontré que, dans le filtre en terre, les polluants sont déposés plus rapidement et plus profondément que dans le filtre à sable à la faveur de cheminements préférentiels. L'épuration mécanique est plus efficace dans le sable que dans le sol. La possibilité d'une adsorption des matières dissoutes sur des minéraux argileux dans le filtre en terre n'apporte aucun avantage.

Le débit spécifique de filtration d'un filtre à sable est en moyenne 4 fois plus important que celui d'un filtre en terre. Les filtres à sable ont donc une efficacité hydraulique nettement plus forte que ceux en terre tout en nécessitant moins de place.

L'évolution de la concentration des MES et du cuivre est approximativement égale dans les filtres en terre et dans les filtres à sable alors que pour le zinc, elle est meilleure d'au moins une classe d'exigence dans les filtres à sable. Les filtres à sable montrent ainsi une performance d'épuration équivalente voire supérieure et ceci malgré une capacité hydraulique supérieure.

L'analyse des coûts d'investissement pour un Système d'Evacuation et de Traitement des Eaux de Chaussées (SETEC) révèle une grande variabilité allant de CHF 100'000 à CHF 600'000 par hectare de chaussée raccordée (valeur médiane: CHF 230'000/filtre en terre - à CHF 200'000/filtre à sable). Le coût d'exploitation annuel moyen est de CHF 3'000/an/ha de surface raccordée pour un SETEC en terre et de CHF 2'000/an/ha de surface raccordée pour un filtre à sable. L'entretien des filtres à sable est nettement plus facile car il n'est pas nécessaire de faucher et d'évacuer l'herbe chaque année. De plus, les surfaces spécifiques de filtre par hectare de surface raccordée sont plus importantes pour les filtres en terre (en moyenne 300 m²) que pour les filtres à sable (en moyenne 200 m²).

En conclusion, les filtres à sable sont à préférer aux filtres en terre. Ils ont un pouvoir d'épuration au moins aussi grand que les filtres en terre et une capacité hydraulique nettement meilleure. Ils sont de surcroît, moins chers à la construction et plus simple à l'entretien.

Summary

The first experiences with soil filters in road runoff treatment facilities (abbreviated as SABA due to the German term Strassenabwasser-Behandlungsanlagen) revealed some of their disadvantages, like poor permeability, tendency to colmatation or insufficient treatment performance. The main argument against soil filters consists in the preferential flux in the soil layer. Sand filters with vegetation covers have been considered advantageous in terms of little demand in space, good hydraulic and also sufficient treatment performances and simplified maintenance. Nevertheless they have been criticized to show a lower capability in retaining the pollutants in comparison with soil filters and hence sand filters have not been recommended for the category of "increased requirements". However some literature references have suggested that sand filters could be superior to soil filters in terms of treatment performance.

The goal of this research was to clarify uncertainties and to compare soil and sand filters in terms of their hydraulic and cleaning performance, and their costs for operation and maintenance, respectively. To do so, the results of 20 facilities' function checks (12 soil filters, 8 sand filters) were assessed. For the evaluation of the investment and operation costs, the data of 49 facilities (31 soil filters, 18 sand filters) were available.

The examinations by means of excavations of the filters show that the particles from the sewage were retained in the filtering layers together with the adsorbed pollutants. In comparison to soil, sand showed a significantly enhanced filter effect; the majority of the particles and pollutants was retained in a sedimentary layer on the surface and in the uppermost cm of the sand layer as a well visible invasion zone. Analyses from soil and sand samples, measurements of the conductivity in retention filter basins and coloring tests with a color tracer resulted in an enhanced preferential flux in soil filters, transporting substances faster and to greater depth than in sand filters. Mechanical filtration occurs more effectively in sand than in soil filters. Even the capability of adsorbing dissolved substances to clay minerals in soil filters does not bring any additional benefits.

The specific hydraulic flux of sand filters is superior to soil filters by a mean factor four. Accordingly, sand filters have a clearly enhanced hydraulic performance and therefore demand less area than soil filters.

The outflow concentrations of total undissolved substances and copper are more or less the same for sand and soil filters, whereas for zinc they are at least better by one performance class for sand than for soil filters. Therefore, sand filters remove the pollutants at least equally well, and additionally more stable than soil filters, despite the higher hydraulic power of sand filters.

The evaluation of the investment costs per SABA ranged from about CHF 100'000 to more or less CHF 600'000 per hectare of drained street area (soil filter: CHF 230'000, sand filter: CHF 180'000, median values). The evaluation of the average annual maintenance costs per hectare of drained street area resulted for a SABA with a soil filter in CHF 3'000 and for one with sand filter in CHF 2'000. Maintaining sand filters is substantially easier; they do not need the annual mowing like soil filters do and no grass clippings have to be disposed of. The specific filter areas per hectare of drained street area turned out to be larger for the evaluated soil filters than for sandy ones (soil filter: circa 300 m², sand filter: circa 200 m², average values).

Hence, sand filters are to be preferred to soil filters. They show at least an equally good cleaning performance as soil filters and this with a much better hydraulic performance. Sand filters are cheaper in construction and easier in maintenance.

1 Einleitung

Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA) mit bepflanzten Retentionsfiltern sind heute übliche Anlagen zur wirkungsvollen Behandlung von Strassenabwasser. Ursprünglich wurden nur Anlagen mit bepflanzten Bodenfiltern gebaut, die ersten Betriebserfahrungen zeigten aber, dass dieser Filtertyp einige Nachteile aufweist. Diese Nachteile waren je nach Situation schlechte Durchlässigkeit, Neigung zur Kolmation oder nicht den Erwartungen entsprechende Reinigungsleistung. Deshalb wurden bepflanzte Sandfilter entwickelt, welche die Nachteile der Bodenfilter beseitigen und dafür Vorteile aufweisen. Als Vorteile sind bisher besonders der geringere Flächenbedarf und der vereinfachte Unterhalt offensichtlich.

Heute wird bei der Projektierung von SABA vermehrt auch der Verbrauch von Kulturland, insbesondere von Fruchtfolgeflächen, kritisiert. Hier besteht Handlungsbedarf. Es ist nach Verfahren zu suchen, deren Retentionsfilterbecken (RFB) eine grössere hydraulische Leistungsfähigkeit aufweisen als die empfohlenen Bodenfilter gemäss BAFU [15].

Bepflanzte Filter sind „lebende“ Systeme mit einem Lebenszyklus. Wenn sie richtig ausgelegt sind, dann sind sie durch die in ihnen ablaufenden biologischen Prozesse sehr robust, und es ist eine mehrere Jahrzehnte dauernde Betriebszeit bei geringem Unterhaltsaufwand zu erwarten.

Bodenfilter können die Schadstoffe im Strassenabwasser zwar zurückhalten, dennoch bestehen Unsicherheit bei Fragen, die den präferenziellen Fluss, die Kolmation, die hydraulische Belastbarkeit und die Vorreinigung betreffen. Unter dem präferentiellen Fluss ist das rasche Versickern des Wassers in Makroporen (z.B. Wurmröhren) zu verstehen. Kolmation bezeichnet das Verstopfen der Filterporen durch feinkörniges Sediment, so dass der Filter undurchlässig wird.

Das BAFU gibt mit der Wegleitung „Gewässerschutz bei der Entwässerung von Verkehrswegen [15] Anhaltspunkte zum zweischichtigen Bodenaufbau bei der künstlichen Versickerung von Regenwasser. Empfohlen werden dort eher schwere Böden mit einem hohen Tongehalt. Man ging davon aus, dass die Tonminerale die Schadstoffe aus dem Strassenabwasser bevorzugt adsorbieren würden. Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass tonhaltige Böden in trockenem Zustand vermehrt präferenziellen Fluss zeigen und im wassergesättigten Zustand eine sehr schlechte hydraulische Leistung aufweisen. Dies führt dazu, dass Bodenfilter mit einem hohen Tongehalt eine eher schlechte Reinigungsleistung aufweisen.

Um diesem Problem zu begegnen, präziserte der VSA in seiner Richtlinie „Regenwasserentsorgung, Update 2008“ [49] diese Vorgaben dahingehend, dass der Gefahr einer schnellen Kolmation von Bodenfiltern durch Einsatz von sandigem Boden vermieden werden kann. In der Praxis werden die Böden allerdings nicht immer nach den Vorgaben dieser Richtlinie aufgebaut. Die Eigenschaften des zur Verfügung stehenden Bodenmaterials sind regional sehr unterschiedlich und weichen mitunter erheblich von einer optimalen Zusammensetzung gemäss VSA-Richtlinie ab. Zudem bestand aufgrund von früheren Beobachtungen an solchen Anlagen die Vermutung, dass zweischichtige Filteraufbauten zur Kolmation neigen. Die derzeit gültige Richtlinie des BAFU [15] bietet keine ausreichende Grundlage für den Bau von Bodenfiltern, welche die genannten Probleme minimieren würden. Erschwerend ist auch die Tatsache, dass die wenigen, bisher durchgeführten Funktionskontrollen nach unterschiedlichen Methoden erfolgten.

In der vom ASTRA 2010 veröffentlichten Publikation „Studie über den Stand der Technik und Ausarbeitung von Behandlungsanforderungen für SABA“ [13] wird bereits auf eine wichtige Neuentwicklung mit modifizierten Bodenfiltern mit einem zweischichtigen Aufbau Boden über Kiessand eingegangen. Es wurde allerdings auch auf die Probleme hingewiesen, die bei diesem Filteraufbau auftreten können.

Bepflanzte Sandfilter standen bisher im Verdacht, die Schadstoffe im Vergleich zu Bodenfiltern weniger gut zurückzuhalten. Deshalb wurden sie bisher nicht für die Kategorie

"erhöhte Anforderungen" vorgeschlagen. Es gab jedoch Hinweise, nach denen bepflanzte Sandfilter den Bodenfiltern in der Reinigungsleistung ebenbürtig oder sogar überlegen sein könnten. So wird in den deutschen Richtlinien [22], [42] und [43] vom Bau von RFB mit Bodenfiltern sogar ausdrücklich abgeraten und an deren Stelle bepflanzte Sandfilter empfohlen. Der Grund dafür ist das Phänomen des präferenziellen Flusses im Boden. Nach neueren Erkenntnissen [Bericht SABA Seltenbach, 78] wird auch von Zweischichtfiltern mit Oberboden über Sand oder Kiessand abgeraten. Bei den bepflanzten Sandfiltern gibt es Wissenslücken zur Stabilität des Schadstoffrückhalts, der Kolmation und wie bei den Bodenfiltern und auch zur erforderlichen Vorreinigung.

2 Ziel, Datengrundlage und Systemabgrenzung

2.1 Ziel

Ziel der vorliegenden Untersuchung war, die Leistungsfähigkeit der Hydraulik und der Schadstoffentfernung von Boden- und Sandfiltern zu beurteilen. Dazu waren die oben erwähnten Hinweise auf Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Filtertypen zu überprüfen und Unsicherheiten auszuräumen. Damit sollte der Retentionsfilter-Typ eruiert werden, der bezüglich Schadstoffrückhalt, Landverbrauch und Betriebs- und Unterhaltskosten optimal ist. Die Ziele waren im Einzelnen:

1. Zu untersuchen war, ob bepflanzte Sandfilter den Bodenfiltern in der hydraulischen Leistung überlegen sind und damit einen geringeren Flächenbedarf erfordern.
2. Die Reinigungsleistung von Boden- und Sandfiltern war zu vergleichen und die Frage zu klären, ob Sandfilter generell auch für die Kategorie „erhöhte Anforderungen“ empfohlen werden dürfen. Dazu waren die wichtigsten Einflussgrößen für die Leistungsfähigkeit der Filteranlagen zu definieren. Die Bedeutung des präferenzzielen Flusses als wichtigstes Argument gegen Bodenfilter war besonders zu untersuchen.
3. Die Kosten für den Betrieb und den Unterhalt der verschiedenen Filtertypen waren zu ermitteln. Auch sollte ein Anhaltspunkt für die zu erwartende Amortisationszeit des Filters als kostenrelevante Grösse zur Verfügung gestellt werden.

2.2 Datengrundlage

Dieser Bericht enthält eine Zusammenfassung der Resultate von Funktions- und Leistungsprüfungen an SABA. Die Untersuchungen erstrecken sich über einen Zeitraum von ca. 2005 bis 2016. Dieser relativ lange Zeitraum bedingte, dass die Untersuchungsmethoden im Detail optimiert wurden. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse war dennoch meistens gegeben. Funktionskontrollen und Leistungsprüfungen (*) wurden an den folgenden Anlagen durchgeführt:

Bodenfilter (12)

- SABA A0 Oensingen
- SABA AS Buchrain
- SABA 6 Ellenwis, Forchstrasse (*)
- SABA EKZ Zugerland
- SABA Hallmatt
- SABA Murg
- SABA Neuwiesen (*)
- SABA Reusstal
- SABA Schutzengel
- SABA Schützenmatt
- SABA Seltenbach (*)
- SABA Wässerimatt

Sandfilter (8)

- SABA Chlosterschür (*)
- SABA Forchstrasse 1 bis 4 (4 Anlagen)(*)
- SABA Ristet (*)
- SABA Sihlbrugg
- SABA Wüerital (*)

Eine Zusammenstellung der für die Auswertung der Kennwerte berücksichtigten Anlagen befindet sich in Anhang II (68; Auszug aus MISTRA SABA).

Das Studium der Fachliteratur zeigte, dass auf dem Gebiet der Strassenabwassereinigung in den letzten zwölf Jahren viele neue Erkenntnisse gewonnen wurden. Wir haben vor allem die neueren Publikationen mit Fokus auf den deutschen Sprachraum ausgewertet und die Erkenntnisse in Kap. 3 „Übersicht: Filtertypen und Substrate“ und Kap. 1 „Verhalten der Schadstoffe im Filter“ zusammengefasst.

2.3 Systemabgrenzung

Diese Untersuchung beschränkt sich im Sinne der Aufgabenstellung auf Anlagen mit Boden- und Sandfiltern und deren Mischformen, wie z. B. Filteraufbau mit Oberboden über Sand oder Kiessand. Gemeinsames Merkmal ist, dass die Filter jeweils bewachsen, also von einer Vegetation bedeckt sind. Die Filter sind daher immer auch durchwurzelt und bilden lebende Systeme. Auf bodenähnliche Substrate und Adsorbiermaterialien als Beimischungen wird nur am Rande eingegangen. Nicht berücksichtigt sind Splitt- und Kiesfilter sowie unbewachsene Sandfilter.

Eine SABA weist in der Regel eine Entlastung, eine Grobstoffabtrennung sowie ein Absetzbecken mit Ölrückhaltefunktion auf. Die Behandlungseinheit einer SABA kann somit aus mehreren Verfahrensschritten bestehen. Diese Komponenten, wie auch Fremdwasserweichen, sind nur am Rande berücksichtigt, sofern sie für das Verständnis der Unterschiede der einzelnen Filtertypen wesentlich waren. Da die untersuchten SABA auf einen hydraulischen Wirkungsgrad zwischen 90 und 96% ausgelegt sind, lag der Fokus auf den Retentionsfiltern.

Ziel dieser Untersuchung war, die Leistungsfähigkeit der Hydraulik und der Schadstoffentfernung der unterschiedlichen Filtertypen zu beurteilen. Somit werden die Systemgrenzen was die Hydraulik betrifft um das Retentionsfilterbecken gezogen. Entlastungen wurden nicht berücksichtigt, es sei denn, sie gaben in den Funktionskontrollen Hinweise auf eine abnehmende hydraulische Leistungsfähigkeit eines Filters. Die hydraulische Leistungsfähigkeit eines Filtertyps bezieht sich deshalb auf die Menge Strassenabwasser, welche pro Zeit und pro Filterfläche durch das RFB bewältigt werden kann.

Bei den Schadstoffen liegen meistens Daten vom Zulauf zur SABA und damit zum Absetzbecken vor. Entsprechend waren dann die Systemgrenzen zu erweitern.

Dieser Forschungsbericht erhebt nicht den Anspruch, ein Handbuch für die Planung und Projektierung von SABA zu sein. Trotzdem haben sich aus der Untersuchung der zahlreichen Anlagen konkrete Hinweise für Projektierung, Bau und Funktionskontrollen von SABA ergeben. Diese Hinweise sind im Anhang III „Hinweise zur Projektierung“ zusammengefasst, ersetzen aber keinesfalls ein Handbuch. Wir verweisen hier auf die entsprechenden Handbücher und Richtlinien.

3 Übersicht: Filtertypen und Substrate

Hinweis:

In diesem Bericht wird zwischen den Filtersubstraten Boden und Sand bzw. Boden- und Sandfiltern unterschieden:

- Boden bzw. Oberboden („Humus“) oder auch Unterboden ist ein biologisch aktives und in der Regel durchwurzelt und aggregiertes Material aus der obersten Schicht der Erdkruste.
- Sand ist ein rein mineralisches Gemisch unterschiedlicher Korngrössen, im Ausgangszustand biologisch kaum aktiv und nicht aggregiert.

In deutschen Publikationen hingegen werden Filter sowohl mit Boden als auch mit Sand einheitlich mit „*Bodenfilter*“ bezeichnet.

3.1 Bau- und Betriebsweise von Retentionsfilterbecken

Retentionsfilterbecken mit bepflanzten Boden- oder Sandfiltern sind biologisch aktive Abwasserbehandlungsanlagen. Sie bestehen meist aus zum Untergrund hin abgedichteten¹ Filterschichten, durch die das mechanisch vorgereinigte Abwasser hindurchgeleitet wird. Über dem Filter befindet sich der Retentionsraum. Das Strassenabwasser durchfließt die Filterschicht und wird durch das Drainagesystem dem Ablaufbauwerk zugeleitet. Bei Sandfiltern kann hier eine Drosseleinrichtung den Abfluss der Anlage begrenzen. Die Filteroberfläche ist immer mit einer geeigneten Vegetation bepflanzt, die möglichst Fremdbewuchs unterdrückt und deren Streu zur Ausbildung einer strukturreichen Filteroberfläche und damit zum Kolmationsschutz beiträgt.

Die Reinigungswirkung beruht auf physikalisch-chemischen und biologischen Prozessen. Der primäre Prozess ist die Filtration, die einen fast vollständigen Rückhalt von Grob- und Feinpartikeln und an ihnen gebundener Stoffe bewirkt. Weitere Prozesse wie Sorption und Umsetzung finden an den Biofilmen der Sedimente auf der Filteroberfläche sowie im Filtermaterial selbst statt. Dort werden auch gelöste Stoffe zurückgehalten und teilweise umgewandelt oder abgebaut. Bewachsene Filter wirken also durch Filtration, Adsorption und biologischen Abbau. Sie reduzieren partikuläre und gelöste Wasserinhaltsstoffe [42] und [57].

3.2 Filtertypen

Eine Differenzierung der verschiedenen Verfahren ergibt sich aufgrund der Art des eingebauten Filtersubstrates und weiterer Anlagekomponenten. In der Schweiz werden zur Behandlung von Strassenabwasser seit Jahren SABA mit bepflanzten Retentionsfilterbecken an Kantons- und Nationalstrassen eingesetzt. Folgende Filtertypen sind gebräuchlich:

- Bodenfilter mit Ober- und Unterboden
- Bodenfilter mit Oberboden über Kiessand oder Sand
- Sandfilter (bepflanzt)

¹ Viele Bodenfilter älterer Bauart sind nicht abgedichtet. Das Wasser versickert also direkt in den Untergrund, was Funktionskontrollen sehr schwierig macht.

In Deutschland richten sich Bemessung und Konstruktion sowie Hinweise zu Bau und Betrieb für Bodenfilteranlagen im Misch- und Trennsystem nach dem Merkblatt DWA-M 178. Ein *Retentionsbodenfilter* ist demnach eine zweistufige Anlage. Die Vorstufe sollte aus einem Regenklärbecken mit Dauerstau bestehen, dem als zweite Stufe das mit Schilf bepflanzte *Bodenfilterbecken*² nachgeschaltet wird. Als Filtersubstrat wird heute in Deutschland fast ausschliesslich karbonathaltiger Sand mit der Körnung 0/2 verwendet.

In Österreich definiert die Richtlinie „Gewässerschutz an Strassen“ [4] den Stand der Technik in der Strassenwasserreinigung für Autobahnen und Schnellstrassen. Vor der Ableitung der Strassenwässer in Fließgewässer oder in das Grundwasser hat die Reinigung über eine Bodenpassage zu erfolgen. Sofern dies nicht breitflächig über die Strassenböschung erfolgt, kann es in einer „*Gewässerschutzanlage*“ (GSA) geschehen. Aufbau und Zusammensetzung des Filtermaterials der Bodenpassage sind als wesentliche Faktoren für den Schadstoffrückhalt in der RVS 04.04.11 in Form von Kennwerten mit einer Bandbreite definiert. Die *Gewässerschutzanlage* für die Reinigung der Strassenwässer kann als Bodenfiltermulde oder als zentrale Beckenanlage mit Absetzbecken und Bodenfilterbecken³ mit Retentionsfunktion ausgeführt werden. [41] [4].

Der Bodenfilteraufbau ist in Österreich standardmässig zweilagig. Auf einem mindestens 20 cm starken mineralischen Filter ist eine 20 cm starke Schicht Oberboden aufzubringen. Um zu verhindern, dass Feinanteile des Bodenfilters in eine grobkörnige Drainageschicht ausgewaschen werden, kann eine Trennschicht (Geotextil) erforderlich sein.⁴ [4]

3.2.1 Bodenfilter mit Ober- und Unterboden

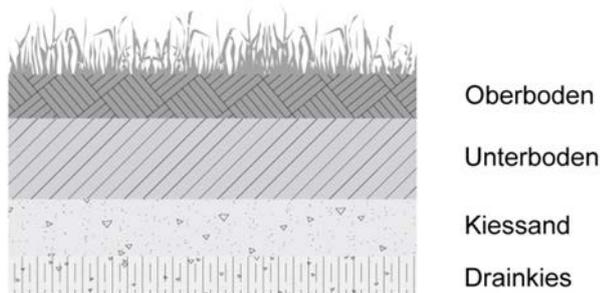


Abb. 1 Schema Bodenfilter mit Ober- und Unterboden

Der belebte Boden ist biologisch aktiv, was für die Strukturbildung wesentlich ist und somit die Funktion des Bodenfilters auf längere Dauer garantiert. Die Reinigung des Strassenabwassers in einem Bodenfilter wird durch physikalische, biologische und chemische Prozesse bestimmt, die sich zum Teil überlagern und gegenseitig beeinflussen. Partikulär vorliegende oder an Partikel gebundene Schadstoffe werden durch die Filterwirkung an der Oberfläche oder in der Bodenfilterschicht abgelagert. Bei der Entfernung der gelösten Inhaltstoffe ist neben der Fällung die Adsorption an der Bodenmatrix der dominierende Prozess. Biologische Vorgänge bewirken in der Folge einen Abbau der organischen Verbindungen und eine Anreicherung anorganischer Stoffe. Ist ausreichend Sauerstoff im Boden verfügbar, kommt es zu einer Umwandlung der festgesetzten organischen Substanzen durch Mikroorganismen wie Bakterien, Einzeller und Pilze. Neben der Mineralisierung, deren Endprodukte Wasser und CO₂ sind, kommt es auch zur Bildung von Huminstoffen. Mikroorganismen und auch höhere Pflanzen sind in der Lage, anorgani-

² Bodenfilter können nach deutschem Sprachgebrauch Boden oder Sand als Filtersubstrat enthalten

³ Unter „Boden“ ist hier immer Oberboden („Humus“) und allenfalls auch Unterboden zu verstehen. Sandfilter sind demnach in der Richtlinie [4] nicht erwähnt.

⁴ Nach unseren Beobachtungen ist hingegen vom Einsatz von Geotextil zur Trennung von Schichten dringend abzuraten. [Bericht SABA Schutzengel und SABA Schützenmatt]

sche Stoffe aufzunehmen. Um diese Prozesse über eine möglichst lange Standzeit ohne Wartung oder Austausch des Filtermaterials zu erhalten, dürfen sich die Durchlässigkeit und damit die hydraulische Leitfähigkeit des Filters gegenüber der Bemessung nicht wesentlich verändern. [41]

Bodenfilter mit Ober- und Unterboden bilden den Aufbau eines natürlichen Bodenprofils nach und weisen meist gute Filtereigenschaften auf. Wichtig für die einwandfreie Filterfunktion ist eine genügende Schichtmächtigkeit. Bei Schichtdicken unter 80 cm dürfte die Reinigungsleistung nicht gewährleistet sein. Gemäss Erkenntnissen des Gewässerschutzes in der Landwirtschaft gilt für natürliche Böden mit einer pflanzennutzbaren Gründigkeit unter 50 cm bereits ein erhöhtes Risiko für die Auswaschung von Pflanzennährstoffen und Pestiziden in den Untergrund. [55]. Es ist anzunehmen, dass dann auch Schadstoffe aus dem Strassenabwasser mehr oder weniger ungehindert in die Drainage gelangen.

Künstlich geschüttete Böden, wie sie in Bodenfilteranlagen vorkommen, sind in der Regel sehr inhomogen. So können die Bodenart und der Steingehalt variieren und es können vor allem im Unterboden auch noch nach Jahren klumpenartige Verdichtungen aus der Bauphase bestehen. Dies bewirkt in der Regel eine unnatürlich hohe Durchlässigkeit bei entsprechend geringer Reinigungsleistung. Diese Besonderheiten können bei einer Beurteilung der hydraulischen Leistung von Bodenfiltern erhebliche methodische Probleme verursachen. [Bericht SABA Forch 6, 65] und [Bericht SABA Neuwiesen, 67]

Bodenfilter mit drei Schichten (Oberboden über zwei unterschiedlichen Unterbodenschichten) mit gut abgestufter Korngrößenverteilung wie z.B. bei SABA Hallmatt können sehr gute Reinigungsleistungen aufweisen. Wesentliche Erschwernis ist der mitunter grosse Aufwand bei der Beschaffung des Materials, vor allem des Unterbodens. Auch der Bau wird aufwendiger, wenn nebst der Drainageschicht noch drei unterschiedliche Filterschichten eingebaut werden müssen. [Bericht SABA Hallmatt, 69]

Wie in der Einleitung erwähnt, kann es sehr schwierig sein, geeigneten und den Richtlinien entsprechenden Unterboden zu finden. Dies beschränkt den Einsatz dieses Filtertyps vermutlich auf Ausnahmefälle.

3.2.2 Bodenfilter mit Oberboden über Kiessand

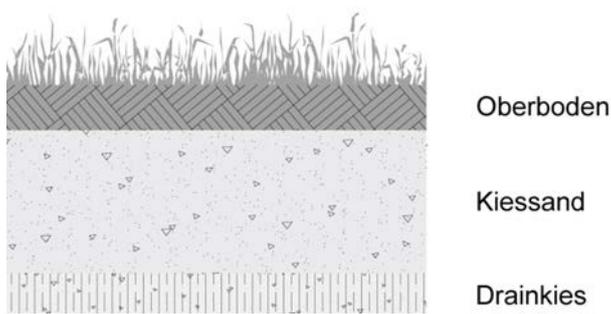


Abb. 2: Schema Bodenfilter mit Oberboden/Kiessand

Bei Bodenfiltern mit Oberboden über Kiessand wird versucht, das Problem des geeigneten, jedoch schwer zu beschaffenden Unterbodens dadurch zu lösen, dass man ihn durch Kiessand ersetzt. Ein typischer Filteraufbau besteht aus ca. 30 cm Oberboden über einer Schicht Kiessand von z.B. 40 cm Stärke.

Bei allen untersuchten Anlagen wurde ausnahmslos beobachtet, dass die Schmutzpartikel die Bodenschicht relativ ungehindert passieren und sich im Kiessand anreichern. Dies ist leicht an der deutlichen Schwarzfärbung unterhalb des Oberbodens zu erkennen. Dieses Phänomen ist auf den präferenziellen Fluss entlang der Aggregatgrenzen und Makroporen zurückzuführen⁵. [Bericht SABA Seltenbach, 78]. Siehe auch Schadstoffprofile in Kap. 4.6.2 Ergebnisse der XRF-Messungen.

3.2.3 Sandfilter

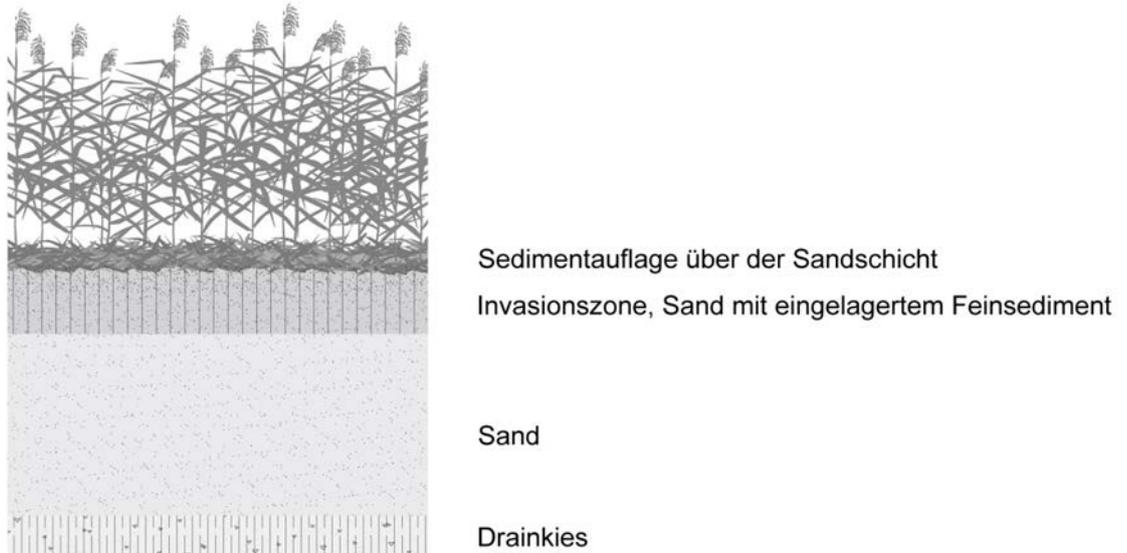


Abb. 3 Schema Sandfilter

In Sandfiltern finden weitgehend die gleichen chemischen, physikalischen und biologischen Reinigungsprozesse wie in Bodenfiltern statt, also Filtration, Sorption und biologische Umsetzung. Der Sand hat als rein mineralisches Substrat bei Inbetriebnahme des Filters eine wesentlich geringere biologische Aktivität als Boden, ist nicht strukturiert und besitzt kaum adsorbierende innere Oberflächen. Die Adsorptionseigenschaften des Sandfilters verbessern sich aber durch die Ablagerung einer feinkörnigen und mit organischer Substanz durchsetzten Sedimentschicht an der Oberfläche und durch die Bildung einer sogenannten Invasionszone aus Sediment bzw. Schmutzpartikeln. Hier wirkt auch das im Strassenschlamm enthaltene Eisenhydroxid als Adsorber für gelöste Stoffe. Eine gewisse biologische Aktivität und Strukturierung stellt sich mit der Zeit ebenfalls ein. Bei der Inbetriebnahme und Einlaufphase ist daher bis zur Ausbildung einer Sedimentschicht an der Oberfläche des Filters mit einem reduzierten Schadstoffrückhalt zu rechnen.

Nach heutigem Kenntnisstand kann der Sandfilter mit einer Höhe von 50 bis 75 cm und einschichtig aufgebaut werden. Eine geringe Filterhöhe ist dann möglich, wenn die Belastung der Zuflüsse mit gelösten, abbaubaren Substanzen gering ist. Geringere Höhen als 50 cm sind wegen dem Verlust von Puffereigenschaften bei Belastungsschwankungen und mit der Gefahr von Kurzschlussströmungen verbunden. Geotextilen als Trennlage gegen die Drainageschicht haben sich nicht bewährt, da sie den Gastransport behindern und die Kolmationsgefahr des Filters erhöhen. [42]

⁵ Die Bildung von Aggregaten im Boden ist ein Prozess, der in Bodenfiltern (wie in jedem natürlichen Boden!) die langfristige Durchlässigkeit und damit Funktionstüchtigkeit garantiert. Gerade die gute Durchlässigkeit kann aber auch ein Nachteil sein; dies besonders, wenn die Bodenschicht relativ geringmächtig und sehr locker gelagert ist.

Es wird auch vorgeschlagen, dem RFB mit Sandfiltern keine Vorbehandlung vorzuschalten. Gemäss Unterlagen der DWA [18] sind Sandfilter mit Schilfbewuchs weitgehend resistent gegenüber Schlammablagerungen. Eine Bedingung ist jedoch häufiges Leeren der Schlammsammler.

3.3 Filtersubstrate

3.3.1 Allgemeine Anforderungen

Korngrössenverteilung

Die primäre Aufgabe des Filtersubstrates besteht in der mechanischen Abtrennung der Feinpartikel. Dabei bestimmen die Korngrössenverteilung und das Porengefüge weitgehend den Rückhalt von feinpartikulären Feststoffen. Diese Aufgabe erfüllt sandiges Substrat besser als bindiges [20]. Es wird deshalb vorgeschlagen, generell sandiges Filtersubstrat zu verwenden, wobei der Feinkiesanteil nicht mehr als 10% betragen sollte.

Organische Substanz

Bei Sand als Filtersubstrat ist, im Gegensatz zu Boden, die organische Substanz aus hydraulischer Sicht entbehrlich. (siehe Kap. 3.3.2 Filtersubstrat Boden)

Eisengehalt

Granuliertes Eisenhydroxid kann in Filteranlagen zur Adsorption von Schadstoffen eingesetzt werden [46]. Der Eisengehalt des Filtersubstrates muss hingegen nicht künstlich z.B. durch Zumischen von Eisenhydroxiden erhöht werden, da nach bisherigen Erkenntnissen, die sich auf dem Filtersubstrat ausbildende, feinpartikuläre Sedimentschicht eisenhaltig ist und die Kapazität besitzt, die gelösten Schwermetalle zu binden. Das Filtermaterial selbst scheint für die Sorption vermutlich weniger bedeutend zu sein [18]. Boden enthält natürlicherweise immer Eisenhydroxid.

Karbonat bzw. ausreichende Basenausstattung

Sand sollte aus Gründen der sicheren pH-Pufferung einen Mindestgehalt von 5% CaCO_3 (Kalk) besitzen. Ist der Karbonatgehalt eines natürlichen Sandes geringer als 5%, sollte er durch Zumischung von Karbonatbrechsand 0/2 auf 10 - 20% Karbonat erhöht werden. Bei Boden ist Düngekalk in der erforderlichen Menge lediglich oberflächlich auszubringen. Dies sichert die mikrobielle Oxidation von CSB/BSB und Ammonium sowie den dauerhaften Rückhalt von Schwermetallen, Polyzyklisch Aromatischen Kohlenwasserstoffen und Mineralölkohlenwasserstoffen.

Stabilität

Filtersubstrate sollten strömungsmechanische Stabilität und ausreichende Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Besonders bei der Schichtung von Substraten mit unterschiedlicher Korngrössenverteilung sind die Filterkriterien nach Terzaghi zu beachten.⁶

Schadstofffreiheit

Das Filtersubstrat Sand muss gemäss den deutschen Richtlinien frei von Schadstoffen sein. In Zweifelsfällen ist die Eignung zu überprüfen. [2] und [42]. Bei Boden kann in der Schweiz nach gängiger Praxis eine für den Strassenbereich typische, schwache chemische Belastung (Schwermetalle) toleriert werden.

⁶ Wir verweisen hierzu auf die einschlägige Fachliteratur zur Geotechnik.

3.3.2 Filtersubstrat Boden

Richtlinien

Es existieren in der Schweiz zurzeit unterschiedliche Richtlinien mit Anforderungen an Boden als Substrat in Filteranlagen zur Reinigung von Strassenabwasser. In der Wegleitung des BAFU [15] werden Werte zur Beurteilung von natürlichen Böden für die Versickerung angegeben, diese gelten gemäss Hinweis in Kap. 4.1.4 "Behandlungsanlagen" auch für Anlagen mit künstlichem Bodenaufbau. Entsprechend dem natürlichen Aufbau des Bodens wird davon ausgegangen, dass der Erdfilter auch einen Unterboden enthält. Bei diesen Richtlinien ist jedoch zu beachten, dass sie offensichtlich nur auf das Reinigungsziel ausgelegt sind und die hydraulische Funktionsfähigkeit des Filters nicht berücksichtigen. D.h. dass bei den in der Praxis geforderten hydraulischen Belastungen die Funktionsfähigkeit vermutlich nicht garantiert ist.

Die in der Wegleitung des BAFU aufgeführten Werte wurden in den vergangenen Jahren verschiedentlich modifiziert. Generell besteht heute die Empfehlung „leichtere“ Böden, zu verwenden, d.h. Böden mit einem höheren Sandanteil. Ein höherer Sandanteil verspricht eine bessere Durchlässigkeit und geringeren präferenziellen Fluss. Besonders in der Literatur aus Deutschland wird verschiedentlich darauf hingewiesen, dass bindige Böden gegenüber Sand wegen des präferenziellen Flusses eine geringere Reinigungsleistung aufweisen. Das an Bodenfiltern mit bindigem Substrat festgestellte Reinigungsvermögen bleibt offenbar hinter dem potentiellen zurück, da die Filter ungleichmässig durchströmt werden. Bei der Verwendung von bindigem Substrat spielen die Kenngrössen Gehalt an organischer Substanz, Kationen-Austauschkapazität (KAK), Calciumsättigung der KAK, Aggregatstruktur und Aggregatstabilität eine wesentliche Rolle. [43]

Bodenart

Die Bodenart bezeichnet die Körnungsklasse der mineralischen Feinerde des Bodens. Diese sollte *lehmreicher Sand* oder *sandiger Lehm* sein, mit einem Tonanteil von 10% bis max. 15% und einem Schluffanteil nicht über 35% wegen der Verschlammungsgefahr.⁷ Die genannten Klassen sind genügend durchlässig und besitzen eine ausreichende Adsorptionskapazität. Bei höheren Tongehalten (Bodenarten *Lehm* und *toniger Lehm*) ist die hydraulische Belastung entsprechend geringer zu wählen und die Schichtstärke zu erhöhen. [15] und [49]

Bodenarten mit einem Tonanteil >15% sind v.a. im Unterboden problematisch. Die Verarbeitung beim Bau des RFB ist kaum möglich ohne Bildung von groben Klumpen und späterem präferenziellem Fluss⁸. Besonders stark steiniger und lehmiger Unterboden kann beim Bau zu relativ grossen, dichten und stabilen Aggregaten führen. Es ist daher mit zu grossen Hohlräumen im Unterboden und somit ausgeprägtem präferenzieller Fluss und einer schlechten Reinigungsleistung zu rechnen. Bei weiterer Setzung ist zu befürchten, dass der Unterboden kolmatiert. [Bericht SABA Murg, 71]

Generell wird heute der Einsatz von sandigem Boden mit einem Tonanteil von maximal 15% empfohlen. Der Skelettanteil (> 2 mm) ist möglichst gering zu halten. Die hydraulische Leitfähigkeit von Boden mit höherem Tongehalt könnte zwar durch das Beimischen von Kies leicht erhöht werden, was jedoch technisch sehr anspruchsvoll ist und die Filterleistung sowie die Stabilität des Bodens negativ beeinflussen würde. [41]

Bodenstruktur

Die Bodenstruktur ist wesentlich für die hydraulische Leistung und somit von zentraler Bedeutung für das Funktionieren eines Bodenfilters. Sie ist keine konstante Eigenschaft des Bodens, sondern weitgehend von der vorhergehenden Bewirtschaftung und der Verarbeitung beim Bau abhängig. Bereits am Entnahmeort verdichtetes Material ist ungeeignet. Bei der Auswahl ist deshalb grösste Sorgfalt notwendig. Mechanische Belastung bei der Verarbeitung (Entnahme, Transport, Lagerung und Einbringen in die Becken) ist zu vermeiden. Die Bepflanzung ist so zu wählen, dass der Boden gut durchwurzelt ist.

⁷ Bezeichnungen nach schweizerischer Bodenklassifikation

⁸ Beispiele sind SABA Ellenwis und SABA Buchrain]

Gehalt an organischer Substanz

Der Gehalt an organischer Substanz (OS) sollte zwischen 2% bis 5% liegen, höhere Werte können bei Wassersättigung wegen der Mineralisation der OS und des in der Folge eintretenden Sauerstoffmangels schnell zu tiefem Redoxpotential führen, mit negativen Auswirkungen auf die biologische Aktivität und damit auch auf die Filterleistung. Auch sind höhere OS-Gehalte oft bei hydromorphen Böden zu finden, die natürlicherweise schlecht durchlässig sein können und somit ungeeignet sind.

Tiefere OS-Gehalte, wie sie in Landwirtschaftsböden gelegentlich vorkommen, sind hingegen kein Ausschlussgrund. Der OS-Gehalt ist keine konstante Eigenschaft, sondern das Ergebnis von Auf- und Abbauprozessen und somit abhängig von den Standortbedingungen bzw. von den Betriebsbedingungen der Anlage.

pH-Wert und Basensättigung

Der pH-Wert sollte im neutralen oder schwach alkalischen Bereich, also über pH 6.5 liegen. Schwach saure bis saure Böden (pH-Wert <6) sind wegen geringer Strukturstabilität und höherer Löslichkeit der Schwermetalle weniger geeignet. Eine Zugabe von Düngkalk oberflächlich ausgebracht kann zur Anhebung des pH-Wertes und Stabilisierung der Struktur sinnvoll sein. Zu berücksichtigen ist, dass mit dem Strassenabwasser in den meisten Fällen (regional unterschiedlich!) auch laufend Karbonat zugeführt wird. Kalkgaben sind immer abhängig vom aktuellen pH-Wert und durch eine Fachperson zu berechnen.

Fachbaubegleitung

Die Auswahl des Bodens, die Überprüfung der Kennwerte und die fachgerechte Verarbeitung beim Bau des RFB machen eine Fachbaubegleitung durch eine erfahrene Fachperson erforderlich. Eine erste Entscheidungsgrundlage für die Auswahl des geeigneten Bodens ist die Bodenkarte. In der Regel ist eine Begehung mit Sondierungen an Ort und Stelle notwendig. Zur Sicherung der Ergebnisse sind Laboranalysen (Körnung, organische Substanz und pH-Wert) sowie eine eingehende Untersuchung der Bodenstruktur zu empfehlen. [3]

3.3.3 Filtersubstrat Sand**Korngrößenverteilung**

Sand umfasst zwar nach Klassifikation die Korngrösse 0 bis 2 mm. Da Sand dieser Korngrösse in der Schweiz schwer erhältlich ist, wird in den weiteren Ausführungen unter Sand immer ein Korngrössengemisch bis 4 mm verstanden.

Für die Anforderungen an den Filtersand bestehen verschiedenen Richtlinien: die DWA-M 178 [22] und die Richtlinie des Kantons Zürich. Diese wurde aus der DWA-M 178 unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse und der Betriebserfahrungen in der Schweiz abgeleitet. Die empfohlene Korngrößenverteilung des Filtersandes ist in **Tab. 1** zusammengestellt.

Tab. 1 Korngrößenverteilung des Filtersandes, Richtlinie des Kantons Zürich 2014

Kornfraktion	[mm]	Empfehlung [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
Ton + Schluff (Silt)	< 0.06	0	0	2
Feinsand	0.06 – 0.20	10	5	25
Mittelsand	0.20 – 0.60	50	25	60
Grobsand	0.60 – 2.00	35	10	45
Feinkies	2.00 – 4.00	5	0	25

(Kanton Zürich, Baudirektion 2014, Teil 2 Richtlinie, 3.13.1 Anforderungen an den Filtersand)

Weitere Eigenschaften

Weitere wichtige Eigenschaften des Sandes sind der Karbonatgehalt, die Kornform und der Feinanteil. Der Sand sollte, einen Karbonatgehalt von mindestens 5% aufweisen, kantengerundet und möglichst frei von Feinpartikeln (Ton und Schluff) sein. Fluviale Sande, wie sie in der Schweiz vorwiegend vorkommen, sind mehrheitlich kantengerundet. Eckige Sandkörner treten bei gebrochenem Sand auf.

In Deutschland wurde in Säulenversuchen bei verschiedenen Sanden gleicher Korngrößenverteilung bei scharfkantigem Korn eine um den Faktor 5.5 geringere hydraulische Leitfähigkeit festgestellt. Es ist zu befürchten, dass Filter mit scharfkantigen, gebrochenen Sanden zu lange Einstauzeiten aufweisen [43]. Scharfkantige Sande zeigen eine bessere Filterwirkung. Die dadurch schnellere Zunahme der Druckverluste muss deshalb mit grösserer Korngrösse kompensiert werden. Weiter gibt es Hinweise, dass scharfkantiger Sand das Wurzelwachstum behindert.

Kantengerundete Sande sind demnach zu bevorzugen. Sie bewirken offenbar eine bessere Durchlässigkeit, fördern gleichzeitig die Ausbildung von Biofilmen und die Durchwurzelung der Filtervegetation. In älteren Richtlinien wurde oft eine runde Kornform gefordert. Rundkorn ist nach neueren Erkenntnissen nicht erforderlich, und wäre in der Schweiz auch nicht erhältlich. Hingegen ist von Brechsand abzuraten. [35]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die wesentlichen Eigenschaften des Sandes grosse Wasserdurchlässigkeit und dauerhafte strömungsmechanische Belastbarkeit sind. Das bedeutet, dass sich das Korngemisch im Filter nicht entmischen darf und z.B. kein Feinanteil in die tieferen Schichten verlagert wird.

Erfahrungen

„Das Filtersubstrat Sand hat sich bisher an allen untersuchten Anlagen bewährt. Die Erfahrungen zeigen, dass Sand Vorteile hinsichtlich Bautechnik, Reinigungsleistung und Kosten bietet. Die Filtrationswirkung gegenüber Feinpartikeln ist bei Sand ab Betriebsbeginn vorhanden.“ [42]

In SABA Ristet wurde festgestellt, dass der Sand zu wenig stabil ist und sich vermutlich teilweise entmischt, so dass im Filter Feinanteil in tiefere Schichten verlagert wird. Diese Verlagerung des Feinanteils beruht vermutlich auf einer ungünstigen Korngrößenverteilung des eingesetzten Sandes. Der in der SABA Ristet eingebaute Sand enthält einen Anteil Mittelsand (0.2 bis 0.6 mm) von lediglich ca. 15%. Demgegenüber sollte gemäss den heute geltenden Richtlinien des Kantons ZH der Anteil 50% (empfohlener Wert) betragen. [Bericht SABA Ristet, 75]

3.3.4 Filtersubstrat Kiessand

Kiessand umfasst ein Korngrössengemisch von 0 mm bis 63 mm. Er kann bei Bodenfiltern als Ersatz für den Unterboden oder bei Sand und Bodenfiltern als unterste Trägerschicht über der Drainage dienen. Die Kiessandschicht stellt sicher, dass der Filter stabil bleibt und nicht in die Drainage aussandet.

An den Kiessand werden in der Regel keine spezifischen Anforderungen gestellt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Durchlässigkeit innerhalb des vom Projekt geforderten Bereichs liegt. Weiter kann sich Feinanteil in der Drainageschicht als problematisch erweisen, da dieser bei nachgeschalteten Stufen wie z.B. einer Sickergalerie zu Problemen führen kann. Im Kanton Bern wird bei neuen Sandfiltern ein gewaschener Kies 16-32mm eingesetzt, wodurch Auswaschungen beim Unterhalt der Drainageleitung verhindert werden. [Mitteilung AWA Bern]

3.3.5 Aufbereiten und Mischen von Substraten

Das Beimischen von Sand zur Verbesserung der Bodenart ist zwar möglich, jedoch technisch sehr aufwendig. Das Problem besteht darin, dass bei der mechanischen Belastung von lehmigem, bindigem Bodenmaterial in Mischtrommeln oder ähnlichen Geräten die bestehende Bodenstruktur zerstört werden kann. Dafür werden künstlich gerundete Aggregate produziert, die an ihren Aussenflächen mit Sand überzogen sind. Diese Aggregate sind im Innern weitgehend undurchlässig und wegen des Sandüberzugs nur locker gelagert. Das Ergebnis kann ein Substrat sein, das ähnliche hydraulische Eigenschaften wie ein Grobkies aufweist.

Im Jahr 2009 wurde ein Pilotprojekt mit Aufbereiten und Mischen von Substrat für die Bodenfilter der N4.2 (Miniautobahn) aus Waldboden und Thursand durchgeführt. Die Ergebnisse der Funktionskontrollen dieser Anlagen liegen noch nicht vor. [Bericht SABA Miniautobahn, 70]

Für die SABA Hallmatt wurde eine Schicht des Unterbodens aus einem Gemisch aus Unterboden von zwei unterschiedlichen Herkunftsorten hergestellt. Dieses Gemisch wies bei einer Zustandskontrolle nach einigen Jahren Betriebszeit lehmige Klumpen mit einem Durchmesser von ca. 5 cm in einer Matrix von *lehmigem Sand* auf. Diese Klumpen waren jedoch porös und von den Pflanzenwurzeln erschlossen. Daraus darf man schliessen, dass auch diese Schicht biologisch aktiv und genügend durchlässig ist. [Bericht SABA Hallmatt, 69]

Falls aus zwingenden Gründen, wie z.B. der Verwertung von anderweitig nicht verwertbarem Boden, verschiedene Komponenten gemischt werden sollen, so hat das mit trockenen Ausgangsmaterialien, mit so geringer mechanischer Belastung wie möglich sowie unter Aufsicht einer Fachperson zu erfolgen.

Über die Verwendung von bodenähnlichen Materialien wie aufbereiteten Reststoffen aus der Kiesgewinnung, Recyclingmaterial, künstlichen Pflanzsubstraten und Reststoffen aus der Vergärung von organischem Material etc. liegen keine Erfahrungen vor. In diversen Publikationen wird davon abgeraten.

Gemäss österreichischer Richtlinie ist das Mischen von Oberboden mit Sand zulässig. Das Beimischen von Kompost, Klärschlamm oder Torf zur Erreichung eines bestimmten OS-Gehaltes ist hingegen nicht zulässig. [41] und [4]

Beimischen von Adsorbentien

Das Mischen von Boden mit Adsorbentien wie Zeolith oder Eisenhydroxid ist aus mehreren Gründen problematisch. Dieses erfolgt in der Regel mit Hilfe von Mischgeräten. Durch die mechanische Belastung beim Mischen besteht wie beim Mischen mit Sand die Gefahr, dass die Bodenstruktur zerstört wird und die hydraulische Leistung des Filters dadurch beeinträchtigt wird.

Der Oberboden besitzt dank seiner Ton-Humuskomplexe bereits schon eine sehr hohe Adsorptionskapazität, so dass der Einsatz eines zusätzlichen Adsorbentien überflüssig ist. Erfahrungsgemäss werden auch die im Zeolith gebundenen Schwermetalle durch Einsatz von Streusalz im Winter wieder mobilisiert und aus dem Filter ausgewaschen. [Bericht SABA Schützengrund und Schützenmatt, 77]

Auch bei Sandfiltern ist der Einsatz von Adsorbentienmaterialien mit Austauschkapazität nicht zu empfehlen. Verschiedentlich wurde festgestellt, dass durch den Einsatz von Streusalz im Strassenunterhalt im Winter die im Adsorbentien gebundenen Schwermetalle rückgelöst werden. Adsorbentien bringen keine bessere Leistung als Sand [18].

Hingegen ergaben mehrere Untersuchungen in der Schweiz, dass mit Einsatz von GEH (granuliertes Eisenhydroxid) im Vergleich zu Sand immer eine bessere Reinigungsleistung zu erzielen ist [7]. [8].

4 Verhalten der Schadstoffe im Filter

4.1 Partikel und Schadstoffe im Strassenabwasser

4.1.1 Partikel

Der Feinanteil im Strassenabwasser enthält Ton und Schluff, Eisenoxide, organische Substanz und Kalk. [18] Gelangt dieser Feinanteil auf einen Sand- Splitt- oder auch Kiesfilter, so wird er an der Oberfläche in Form einer Sedimentauflage abgelagert und wirkt dort als Sekundärfilter.

Dank seiner Zusammensetzung vermag dieser Sekundärfilter weiteren Feinanteil zurückzuhalten und Schadstoffe zu adsorbieren.

Der Feinanteil weist allerdings je nach Einzugsgebiet eine stark unterschiedliche Zusammensetzung auf. Eine Analyse der Ablagerungen auf den vorgeschalteten Kiesfiltern der beiden an der gleichen Strasse gelegenen SABA Chlosterschür und SABA Neuwiesen zeigte deutlich unterschiedliche Schadstoffbelastungen. Die Ablagerungen bei Chlosterschür weisen nur ungefähr halb so hohe Schwermetall-Konzentrationen wie bei Neuwiesen auf. [Bericht SABA Chlosterschür und Neuwiesen, 67]

Im Einzugsgebiet der SABA Chlosterschür befindet sich ein Betrieb, durch dessen Transporte regelmässig ton- und kalkhaltige Feinstoffe in das Strassenabwasser gelangen. Zudem wurde zeitweise Bachwasser auf die SABA geleitet.

Unterschiedliche Belastung - Vergleich Chlosterschür-Neuwiesen

Tab. 2 SABA Chlosterschür und Neuwiesen, Analyse der Ablagerungen auf den Kiesfiltern, 2010 [Mitteilung ilu AG]

	SABA Neuwiesen	SABA Chlosterschür
Menge	0.5 cm mächtig (0.05 m ³ /ha)	1.0 cm mächtig (0.1 m ³ /ha)
Glührückstand	74.1% von TS	84.2% von TS
Kupfer (gesamt) XRF	525 mg/kg TS Cu	223 mg/kg TS Cu
Zink (gesamt) XRF	2020 mg/kg TS Zn	940 mg/kg TS Zn
Summe PAK	33 mg/kg TS	23 mg/kg TS
Beurteilung	typische Werte	Fremdwasser und Staub von Kieswerken

Ein Vergleich der Analysewerte der Sedimentauflagen in den RFB zeigt, dass bei Chlosterschür die Werte für Ton mit ca. 15% relativ hoch sind. Zum Vergleich ist noch ein Wert aus Messungen der Sedimentauflage auf dem Sandfilter der SABA Ristet angegeben (Abb. 4), wo die Zusammensetzung des Sediments ähnlich wie bei SABA Chlosterschür ist. Bei SABA Ristet ist bekannt, dass durch Erosion der Böschungen tonhaltiges Bodenmaterial in das RFB geschwemmt wurde.

Da in der SABA Neuwiesen ein Bodenfilter eingebaut ist, weist das Filtersubstrat bereits schon im Ausgangszustand einen Tongehalt von ca. 18% auf. Auch hat sich dort, abgesehen von der Zone beim Zulauf, keine eigentliche Sedimentauflage entwickelt. Abb. 4 zeigt die Feinanteile der SABA Chlosterschür, Neuwiesen und Ristet. Die Analysenwerte der obersten Bodenschicht (0-10 cm) zeigen aber, dass bei Profil 1 (stark belastete Zone) fast ausschliesslich Schluff eingetragen wurde und der Tongehalt relativ dazu abgenommen hat (siehe auch Kap. 4.4 Schadstoffprofil im Bodenfilter). Bei Profil 2 (schwach belastete Zone) hat nur der Schluffgehalt leicht zugenommen, während der Tongehalt ungefähr konstant geblieben ist. Als Referenzwert (Nullwert) dient eine Analyse des Bodens vor der Inbetriebnahme.

Ein Vergleich der Analysenwerte von Kupfer und Zink im Sediment bzw. der obersten Bodenschicht zeigt ausserdem, dass die Konzentrationen in Neuwiesen ungefähr um einen Faktor 1.4 höher sind als in Chlosterschür. Auch das ist ein Hinweis, dass die Schadstoffe bei Chlosterschür durch Fremdwasser verdünnt wurden. Die Dimensionierung und die spezifische hydraulische Belastung sind mit Neuwiesen vergleichbar.⁹

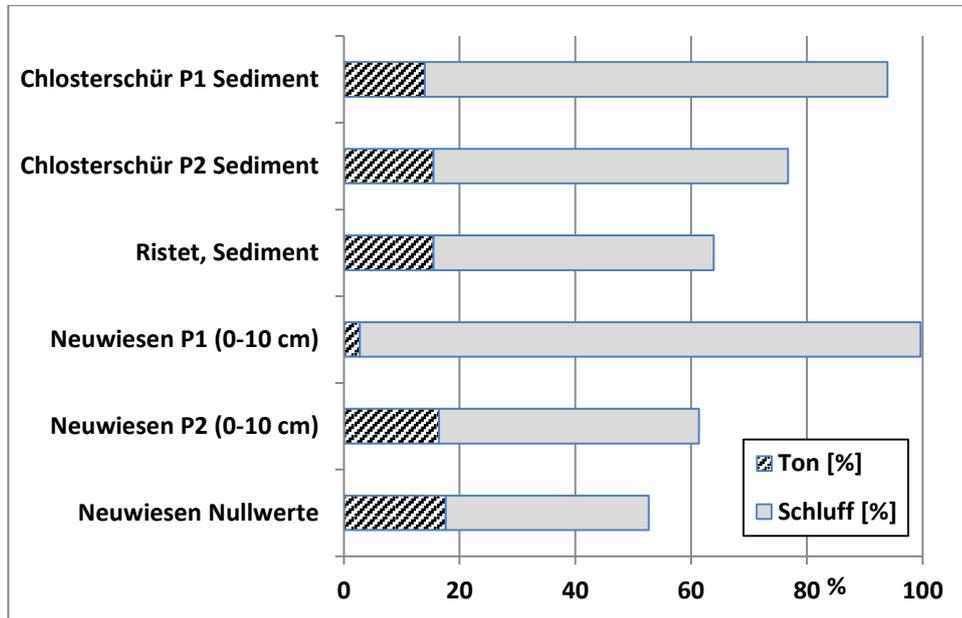


Abb. 4 Vergleich der Feinanteile (Ton+Schluff) im Sediment in den RFB von SABA Chlosterschür und Neuwiesen sowie SABA Ristet, Der starke Rückgang des Tongehaltes bei Neuwiesen P1 beruht lediglich auf dem Eintrag von Schluff. D.h. es wurde kein Ton in tiefere Schichten verlagert. (Ton+Schluff+Sand = 100%)

4.1.2 Schwermetalle

Die Schadstoffkonzentrationen im Sediment eines Filters nehmen während des Betriebes nicht wesentlich zu. Dies ist plausibel, da die Schadstoffe vorwiegend an die Partikel im Sediment gebunden sind und zusammen mit den mineralischen Partikeln in einem ungefähr konstanten Verhältnis anfallen. Es ist davon auszugehen, dass im Sediment die höchstmögliche Belastung im Filter herrscht. Diese hängt ab von der Schadstoffkonzentration im Strassenabwasser. Die Einflussgrössen sind: DTV, Art der Strasse und Fahrbahn, Verschmutzung der Fahrbahn durch Böschungserosion, Kiestransporte, Landwirtschaft etc. Entscheidend ist auch, ob es sich um eine Autobahn oder um eine Kantonsstrasse handelt (keine Verdünnung durch Pannestreifen). [Bericht SABA Ristet, 75] und [Bericht SABA Sargans, 76]

Tab. 3 Kupfer- und Zinkkonzentrationen in Filtern

SABA	Alter [a]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Bemerkung
Hagnau	3	552	2410	Splitfilter, vermutlich "Obergrenze"
Ristet	2	108	376	Filterkuchen
Sargans	>30	374	1726	Oberboden 0-20 cm
Seltenbach	8	113	470	Oberboden 0-5 cm
Sihlbrugg	k.A.	228	1160	Filterkuchen

[Quellenangabe: Berichte der genannten SABA]

⁹ Das Beispiel zeigt auch, dass jeder Fall einzeln zu betrachten ist und es deshalb schwierig ist, allgemeingültige Regeln für alle Anlagen aufzustellen. Ein Filter muss den örtlichen Gegebenheiten angepasst sein.

4.1.3 Organische Schadstoffe

Die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) liegen im Strassenabwasser zu ca. 95% in partikulärer Form vor. [18] Ergebnisse aus Deutschland zeigen, dass bei unterschiedlichen Filtersubstraten Wirkungsgrade über 90% der Filtration gemessen werden konnten. Da PAK hauptsächlich an Partikel gebunden sind, ist davon auszugehen, dass die Filtration der wesentliche Reinigungsmechanismus ist und die Adsorptionsstärke des eingesetzten Filtersubstrates nur eine untergeordnete Rolle spielt. [35].

Versuche in Österreich ergaben vergleichbare Ergebnisse. Auch hier wurde gezeigt, dass die PAK meist an Partikel gebunden sind und somit weitgehend abfiltriert werden können.

Die Entfernung von Mineralöl (Kohlenwasserstoffe) in Säulenexperimenten ergab Wirkungsgrade von >97%. Allerdings ist nicht klar, ob die Entfernrungsrate von der tatsächlichen Adsorption oder von der Oberflächenbindung abhängig ist. [41]

4.1.4 Phasenverteilung der Schadstoffe

Die Schadstoffe (Schwermetalle, PAK und KW) sind vorwiegend an Partikel gebunden. Für die Bindung ist ein pH-Wert im Bereich von 6,5 bis 8 notwendig. Dieser Umstand bewirkt, dass durch Filtration der grösste Teil der Schadstoffe aus dem Wasser entfernt werden kann. [2], [37] und [47]

Der grösste Anteil der Schadstofffracht (ca. 70 bis 85%) ist an den kleinsten Partikeln (6-60 µm) adsorbiert. [6], [35].

Nach eigenen Untersuchungen liegt der partikulär gebundene Anteil der Schwermetalle Kupfer und Zink im Zulauf zu einer SABA zwischen 70% und 90%. Der Rest, also 10 - 30% ist gelöst. [57]. Entsprechend spielt beim Schwermetallrückhalt zusätzlich zur Filtration auch die Adsorption dieser gelösten Stoffe an Tonminerale und organische Substanz eine wichtige Rolle.

4.2 Prozesse in Boden- und Sandfiltern

Wasserfluss

Der Wasserfluss im Filter ist ein nichtlinearer Prozess. Das heisst, dass je nach Systemzustand die Menge des Sickerwassers welche ins Drainagesystem gelangt, bei gleichem Niederschlag bzw. Zufluss beträchtlich variieren kann. Neben Unterschieden der Durchlässigkeit in vertikaler Richtung treten auch beträchtliche Unterschiede in horizontaler Richtung auf. Der Wasserfluss ist von Potenzialgradienten angetrieben: Das Wasser fliesst im Allgemeinen als Folge der Gravitation von oben nach unten, von feuchten Bereichen zu trockenen oder von Bereichen mit hohem Wasserdruck zu solchen mit niedrigerem. Die kombinierten Effekte von lokalen Potenzialgradienten und unterschiedlicher Durchlässigkeit können zu stark heterogenen Flieismustern führen.

Lokale Vernässung durch Fremdwasser oder längere Perioden mit Einstau führen zur Veränderung der Bodenstruktur bzw. der Struktur der Sedimentauflage. Dies führt wiederum zu einem stetigen Rückgang der hydraulischen Leistungsfähigkeit und entsteht ein Zirkel, der früher oder später zur Kolmation des Filters führt.

Partikeltransport und Filtration

Die Partikel werden an der Oberfläche eines Sandfilters abfiltriert. Die so gebildete Sedimentschicht (Filterkuchen) und die mit Partikeln verstopften Poren im Filtermaterial verbessern die Entfernung von feinen Sedimentpartikeln aufgrund des reduzierten Porenraumes. Die Einlagerung von Partikeln in den Hohlräumen des Filtermediums kann die Unterschiede der Form der Filterkörner ausgleichen und Abweichungen zwischen verschiedenen Filtermaterialien kompensieren. Die mechanische Filtration spielt somit eine zentrale Rolle bei der Reinigung des Strassenabflusses. [2], [41]

Versuchsreihen zeigten, dass Substrate mit einem d_{10} -Wert > 0.5 mm den Partikeltransport begünstigen, während d_{10} -Werte < 0.5 mm eine hohe Partikelabscheidung begünstigen. In feinkörnigen Substraten bildet sich eine homogene Infiltrationsfront (Invasionszone) aus. Hingegen entstehen in grobkörnigen Substraten und bei hohen Fließgeschwindigkeiten ungleichmässige Strömungen, was zu geringerer Partikelabscheidung führt. Kalzium-Ionen wiederum begünstigen die Partikelabscheidung. [17]

In bindigem Boden ist der Partikelrückhalt bei Trockenheit wegen des präferenziellen Flusses in den Schwundrissen nicht besonders hoch. [41]. Dieser Befund wird auch durch die Augsburgener Versuche an Lysimetern bestätigt, wo bei zu Rissbildung neigenden, bindigen Böden oder bei grobem Kornaufbau schnelle Tracerdurchgänge gemessen wurden.

In diesen Versuchen zeigte der Sandfilter die beste Filtrationsleistung, die im Laufe der Betriebszeit aufgrund des Feinpartikeleintrages noch zunahm. [2]

Um die Funktionsweise eines Sandfilters zu verstehen und die Wirkung von präferenziellen Fließwegen zu untersuchen wurden am AWEL des Kantons Zürich vor einigen Jahren zweidimensionale CFD-Simulationen gemacht. Gemäss Hermann (2010) werden sehr feine Teilchen in Sandfiltern auch dann zurückgehalten, wenn sie kleiner sind als der typische Porendurchmesser. Sie lagern sich nicht nur in engen Stellen im Porensystem an, sondern auch vor den viel grösseren Sandkörnern. Im Gegensatz dazu führt ein präferenzieller Fließweg dazu, dass in der ihn umgebenden Matrix umso weniger Wasserfluss stattfindet, da sein Vorhandensein zu einem Druckabfall in der Umgebung führt. [28]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in Boden- und Sandfiltern folgende Prozesse ablaufen: [37]

- Oberflächenfiltration mit Aufbau einer Sedimentschicht ("Filterkuchen"), was zu einem Sekundärfilter aus Sediment führt. Dieser Filterkuchen trägt mehr zur Schadstoffsorption bei als das darunterliegende Filtermaterial.
- Tiefenfiltration im Filterkörper
- Sorption und Einbau von Schadstoffen sowohl im Sediment (Filterkuchen) als auch im Filtermaterial
- Bei Strassenabflüssen tritt dank dauernder Nachlieferung von Partikeln keine "Erschöpfung" des Partikelrückhaltes ein. Die Standzeit ist zumindest theoretisch "unendlich". Dem gegenüber steht die Überlegung, dass die Einlagerung von Partikeln im Porenraum zu einem Druckverlust führt. Dies muss früher oder später zum Verstopfen des Filters führen.
- Der pH-Wert bleibt stabil, sofern aus dem Einzugsgebiet genügend Basen nachgeliefert werden.

Adsorption

Als Adsorption wird die Bindung von gelösten Stoffen an einen festen Körper (Sorbenten) bezeichnet. Dabei wird zwischen der unspezifischen Adsorption, einer Oberflächenbindung durch Coulomb'sche Kräfte und der wesentlich stärker bindenden spezifischen Adsorption unterschieden. Bei der spezifischen Adsorption werden Metallkationen des Sorbenten durch Liganden der adsorbierten Stoffe ausgetauscht. Die Sorbenten im Boden sind, neben Tonmineralen und Huminstoffen, hydroxylierte Oberflächen von Eisen-, Aluminium- und Manganoxiden. Die spezifische Adsorption von Schwermetallen ist stark vom pH-Wert abhängig. Im sauren Bereich kommt es zur Rücklösung der adsorbierten Partikel. Die Mobilisierung beginnt für Blei bei pH 4.0, für Kupfer bei pH 4.5 und für Zink bei pH 5.5 bis 6.0 [41]

Sorbiert ein Stoff an festen Bodenbestandteilen, wird seine Verlagerung verlangsamt. Die Sorptionskapazität wird meist aufgrund von Sorptionsisothermen beschrieben. Diese geben die Gleichgewichtsverteilung zwischen der sorbierten Menge und der Konzentration in der Bodenlösung an. Für den Transport relevant ist die Ableitung dieser Isotherme nach der Konzentration. Sättigungseffekte führen zu nichtlinearen Isothermen.

Bei der Versickerung des Strassenabflusses durch sein eigenes Sediment (Sedimentfiltration) können gemäss [2] neben dem mechanischen Rückhalt abfiltrierbarer Stoffe auch die noch nicht partikulär gebundenen, gelösten Schadstoffe durch das Sediment gebunden werden. Dem widerspricht allerdings die Überlegung, dass die Sedimentauflage, was die Sorption von gelösten Schadstoffen betrifft, mit den zufließenden Konzentrationen über längere Zeit betrachtet im Gleichgewicht ist. Dieses Gleichgewicht bildet sich bereits teilweise während des Zulaufs zur SABA und in den Schlamm-sammlern aus. Deshalb ist es aus unserer Sicht eher so, dass der Schadstoffrückhalt der gelösten Stoffe von der Höhe der Sedimentauflage unabhängig ist. (vgl. Kap. 4.5.2 Bedeutung der Sedimentauflage)

Was sich hingegen mit der Betriebszeit verbessern sollte, ist die Filtrationswirkung für Partikel und Kolloide, da die Sedimentauflage als Raumfilter betrachtet immer höher wird.

In Österreich wurden Versuche zur Bestimmung der Sorptionskinetik mit verschiedenen Filtermaterialien in Batchexperimenten mit Kontaktzeiten für Sorbat/Sorbens von 5 bis 2880 Minuten durchgeführt. Als Sorbat diente eine Schwermetalllösung mit definierten Konzentrationen. Die Ergebnisse zeigen, dass bis auf das Filtermaterial Quarzsand eine Kontaktzeit von 5 Minuten zur Erreichung des Gleichgewichtes ausreicht (Entfernungsrate > 90%).

Berücksichtigt man alle Schwermetalle und Sorbentien, dann zeigen Boden und Sand nach 5 Minuten Kontaktzeit bereits die höchsten Entfernungsraten. Die Adsorptionsversuche ergaben für die meisten Materialien, welche die Anforderungen einhalten konnten, gute Ergebnisse. Der Partikelrückhalt nach einer „Einfahrzeit“ der Filter und die damit verbundene Erhöhung der Kontaktzeit bewirkte eine verbesserte Adsorption der Schwermetalle. [41]

Fällung

Fällungsreaktionen sind stark von dem im Boden vorherrschenden Milieu abhängig. Dazu zählen neben Temperatur und pH-Wert auch die Konzentration von organischen Komplexbildnern und Ionen im Bodenwasser [44]. Mit Erreichen des Löslichkeitsprodukts werden die Schwermetalle in Abhängigkeit von ihrer Löslichkeit ausgefällt. [41]

Mineralisierung der organischen Substanz und DOC-Freisetzung

Messungen an Versuchsanlagen in Deutschland zeigten, dass die mit humosem Oberboden eingebrachte organische Substanz zu einer Leistungsminderung des Filters führen kann. Um die DOC-Freisetzung mit möglichen negativen Folgen für die Filtrationsleistung zu verhindern und die weitgehende Mineralisierung der organischen Substanz zu ermöglichen, sei die Verwendung von humusfreien Filtersubstraten anzuraten und ein schnelles Trockenfallen der Sedimente Voraussetzung. In einer Versuchsanlage führte offenbar der hohe DOC-Gehalt zu einer Erhöhung des Zinkgehaltes im Ablauf. [2].

Dieses Argument spricht für Sandfilter und sicher gegen den Einsatz von Zusatzstoffen mit hohem Gehalt an organischem Material wie z.B. Kompost.

4.3 Methoden der Filteruntersuchungen

Generell wurden bei allen durch die Autoren ausgeführten Funktionskontrollen die folgenden Methoden angewendet: Die Filteroberfläche der RFB wurde auf Vegetation, Kolonisationserscheinungen und weitere, im Sinne des Untersuchungszieles wichtige Merkmale hin untersucht.

In der Regel wurden zwei Profile bis zum Drainagekies aufgegraben. Profil 1 lag meist in einer relativ stark belasteten Zone in der Nähe des Einlaufbauwerkes, während Profil 2 in einer relativ schwach belasteten Zone, meist in der Mitte oder am anderen Ende des Beckens lag. Die Schichten wurden nach den bodenkundlichen Methoden visuell untersucht und dokumentiert. Für weitere Untersuchungen im Labor und Analysen wurden pro Profil 4 bis 5 Proben nach individuell angepasstem Schema entnommen.

Das Beprobungskonzept berücksichtigte die Erfahrung, dass sich die Schadstoffbelastung als mehr oder weniger deutliche Front eingeschwemmter Partikel von der Oberfläche her in die Tiefe verlagert. Bei Bodenfiltern wurden die Proben im Oberboden und in der darunterliegenden Schicht (Unterboden oder Kiessand) meist in je zwei bis drei unterschiedlichen Tiefen entnommen. Die in Sandfiltern entnommenen Proben berücksichtigten die visuell feststellbaren Schichten Sedimentauflage, Invasionszone und sauberen Sand. Bei Boden- und Sandfiltern wurden also die Schichttiefen für die Beprobung jeweils der Situation angepasst.

4.4 Schadstoffprofil im Bodenfilter

Oberbodenschicht

In der obersten Zone eines Bodenfilters entwickelt sich wie bei Sandfiltern ebenfalls eine Invasionszone, jedoch keine eigentliche Sedimentauflage. Das Sediment wird offenbar durch die biologische Aktivität des Bodens laufend eingearbeitet¹⁰. In stark belasteten Zonen beim Zulauf kann diese Invasionszone sehr ausgeprägt werden und zu einer messbaren Anreicherung der Partikel nahe der Oberfläche führen.

In SABA Neuwiesen mit einem Filter vom Typ Oberboden/Kiessand entwickelte sich bei Profil 1 (stark belasteter Bereich) eine ausgeprägte Invasionszone. Der Feinanteil (Ton + Schluff) des Oberbodens betrug ca. 53% im Ausgangszustand vor Inbetriebnahme. Durch den Eintrag von Partikeln aus dem Strassenabwasser wurde dieser Wert auf ca. 99% erhöht und auch das Verhältnis von Ton- zu Schlufffraktion verändert. Auffallend ist der bei der letzten Messung 2016 extrem hohe Wert der Schlufffraktion von ca. 97% in Profil 1 in der stark belasteten Zone beim Zulauf. Dieser Wert wurde in einer Nachanalyse bestätigt und zeigt, dass sich hier Sediment in der obersten Zone des Bodenfilters anreichert und nicht mehr durch biologische Aktivität in die Tiefe verlagert werden kann. Daraus ist zu schliessen, dass der Filter hier lokal überlastet ist.

In der obersten Schicht des Bodens entwickelt sich demnach im stark belasteten Bereich nahe beim Zulauf eine Invasionszone, wie sie sonst nur bei Sandfiltern beobachtet wurde. Diese weist einen relativ hohen Schluffgehalt auf, Ton wird hingegen eher in die Tiefe verlagert. Was dies für die Funktion des Bodenfilters bedeutet ist noch nicht klar. Tendenziell könnte also durch diesen Prozess die Durchlässigkeit des Filters abnehmen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Oberfläche immer bewachsen ist und der Filter regelmässig trocken fallen kann, so dass die Aggregatstruktur erhalten bleibt. [Bericht SABA Chlosterschür und SABA Neuwiesen, 67]

Unterboden- oder Kiessandschicht

In allen Bodenfiltern wurde zudem beobachtet, dass die Partikel aus dem Strassenabwasser nicht nur in der Oberbodenschicht eingelagert werden, sondern diese auch leicht durchdringen und in tiefere Schichten, d.h. entweder in den Unterboden oder in den Kiessand gelangen können. In der SABA Neuwiesen (Boden/Kiessand) ist die Einlagerung von Sediment bzw. Feinanteil aus dem Strassenabwasser im Kiessand unter der Bodenschicht deutlich nachweisbar. Die Zunahme des Feinanteils beträgt ca. 150% gegenüber dem Ausgangswert. Ein hoher Feinanteil im Kiessand könnte mit der Zeit zur inneren Kolmation des Filters führen. Es wäre aber auch denkbar, dass Kiessand zu wenig effizient filtert und einen Teil der partikulären Schadstoffe passieren lässt. Allerdings liegen hierzu ebenfalls noch zu wenige Erfahrungen vor. [Schlussbericht SABA Chlosterschür und Neuwiesen, 67]

¹⁰ Die wichtigsten Prozesse sind Quellen und Schrumpfen der Bodenmatrix mit Verlagerung von Bodenpartikeln in den Grobporen, Wirkung des Frostes und Tätigkeit der Bodenfauna.

Aus allen bisherigen Beobachtungen an Filtern mit Oberboden über Kiessand lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Schadstoffe werden von einer ca. 30 cm starken Bodenschicht nur ungenügend zurückgehalten. Der Kiessand übernimmt dann die Funktion einer zweiten Barriere. Im Vergleich zu Sandfiltern werden die Schadstoffe in vergleichbarem Zeitraum stärker in die Tiefe verlagert.
- Als Folge des präferenziellen Flusses und der Kapillarsperre am Übergang zwischen zwei Substraten stark unterschiedlicher Porosität reichern sich an der Grenzschicht zwischen Oberboden- und Kiessandschicht die Sedimentpartikel an. Es könnte daher die Gefahr bestehen, dass diese Grenzschicht kolmatiert. Eine solche (vollständige) Kolmation wurde aber bisher noch nie beobachtet und wäre auch in den Anfängen nicht so einfach zu erkennen, denn Messungen der hydraulischen Durchlässigkeit der Grenzschicht wären nur mit sehr grossem Aufwand möglich. Der präferenzielle Fluss scheint das Hauptproblem dieses Filtertyps zu sein.
- Die Reinigungsleistung dürfte wegen der hohen Adsorptionskapazität des Bodens und der zusätzlichen Filterwirkung der Kiessandschicht als zweiter Barriere gut sein. Wegen der im Vergleich zu anderen Filtertypen relativ raschen Verlagerung der Schadstoffe in die Tiefe ist hingegen im Vergleich zu Sandfiltern eher eine relativ geringe Lebensdauer zu erwarten. [Bericht SABA Seltenbach, 78] [Bericht SABA Chlosterschür und Neuwiesen, 67]

Siehe dazu auch die Diagramme in Kap.4.6.2 Ergebnisse der XRF-Messungen.

Ein inzwischen aufgehobenes Versickerungsbecken mit Ober- und Unterboden beim Anschluss Bad Ragaz A3/A13 zeigte bei einer Überprüfung im Jahre 2006 nach über 30 Jahren Betrieb folgendes Bild:

Der Boden war zwar „massiv mit PAK, Russ und mit Schwermetallen belastet“ (Cu 374 mg/kg TS, Zn 1726 mg/kg TS, Pb 558 mg/kg TS, PAK 52 mg/kg TS). Die Schadstoffe konzentrierten sich aber auf die obersten 30 cm und reichten teilweise bis in die Tiefe von 40 cm. In diesem Bereich wurde bei den PAK der Richtwert nach VBBo um mehr als das 50-fache, bei Blei um das 11-fache überschritten.

In einer Tiefe von 45 bis 50 cm ab Oberkante Terrain war nur noch der Richtwert (VBBo) für PAK leicht überschritten. Zudem wurde festgestellt, dass an vernässten Stellen, organische Schadstoffe aus den abgelagerten Feststoffen gelöst und in die Tiefe verlagert wurden. Dadurch lag an der tiefsten Stelle des Beckens bis in eine Tiefe von rund 60 cm der Wert für PAK bei ca. 180% des Richtwertes nach VBBo. [Kt. St. Gallen 2006].

Dieses Beispiel zeigt, dass ein Bodenfilter die Schadstoffe wirksam zurückhalten kann. Allerdings handelte es sich hier um einen natürlichen und nicht um einen künstlich geschütteten Boden, wie dies in neueren SABA üblich ist.

4.5 Schadstoffprofil im Sandfilter

4.5.1 Verlagerung von Partikeln und Ausdifferenzierung von Schichten

Bei Sandfiltern stellt sich durch den Eintrag von Feinanteil mit der Zeit eine Ausdifferenzierung in Sedimentauflage, Invasionszone und sauberen Sand ein. Sowohl Sedimentauflage als auch Invasionszone waren in allen untersuchten Sandfiltern gut strukturiert, porös und entsprechend gut durchlässig. Diese in den Profilen zu beobachtende Ausdifferenzierung konnte bisher an allen untersuchten Sandfiltern bestätigt werden. Bedingung für die Strukturierung der obersten Filterschichten sind die Vegetation mit Streuschicht und das regelmässige Trockenfallen des Filters. [Bericht SABA Chlosterschür, 67] und [Bericht SABA Ristet, 75]

Der Feinanteil (Ton + Schluff) ist in der Sedimentauflage erwartungsgemäss am höchsten und nimmt mit zunehmender Tiefe ab. In der SABA Ristet betrug er in der Messung 2016 bei Profil 1 ca. 60% und bei Profil 2 ca. 67%. Bemerkenswert ist, dass das Verhältnis von Ton zu Schluff in der Sedimentauflage ca. 0.3 beträgt, während es in den der Invasionszone und im darunterliegenden Sand bei ca. 1 liegt. Bei den Analysen 2008 war das Verhältnis in der Sedimentauflage ähnlich, in den darunter liegenden Schichten jedoch geringer als heute bzw. wurde vermutet, dass dieser Feinanteil von ca. 2% ungefähr dem Ausgangswert des Sandes entsprach. Dies bedeutet, dass Feinanteil aus dem Strassenabwasser verlagert wurde und dass der Ton leichter als Schluff in die tieferen Schichten transportiert und dort eingelagert wird. [Bericht SABA Ristet, 75]

Ebenfalls beobachtet wurde dies in der SABA Chlosterschür. Die Messungen der Körnung zeigten, dass Partikel $<2\mu\text{m}$ (Ton) bevorzugt in die Tiefe verlagert werden, während Schluff eher an der Oberfläche zurückgehalten wird. Eine Tonanreicherung in der Tiefe kann unter ungünstigen Bedingungen zur Kolmation führen. In diesem Zusammenhang ist darauf zu achten, dass das RFB immer bewachsen ist und regelmässig trocken fallen kann, damit die Sedimentauflage ihre Struktur behält. Für eine sichere Beurteilung fehlen allerdings noch Vergleichswerte.

Es ist davon auszugehen, dass die Sedimentauflage mit weiterem Betrieb kontinuierlich wächst und deren Filterwirkung zunehmen wird. [Bericht SABA Wüerital, 79]

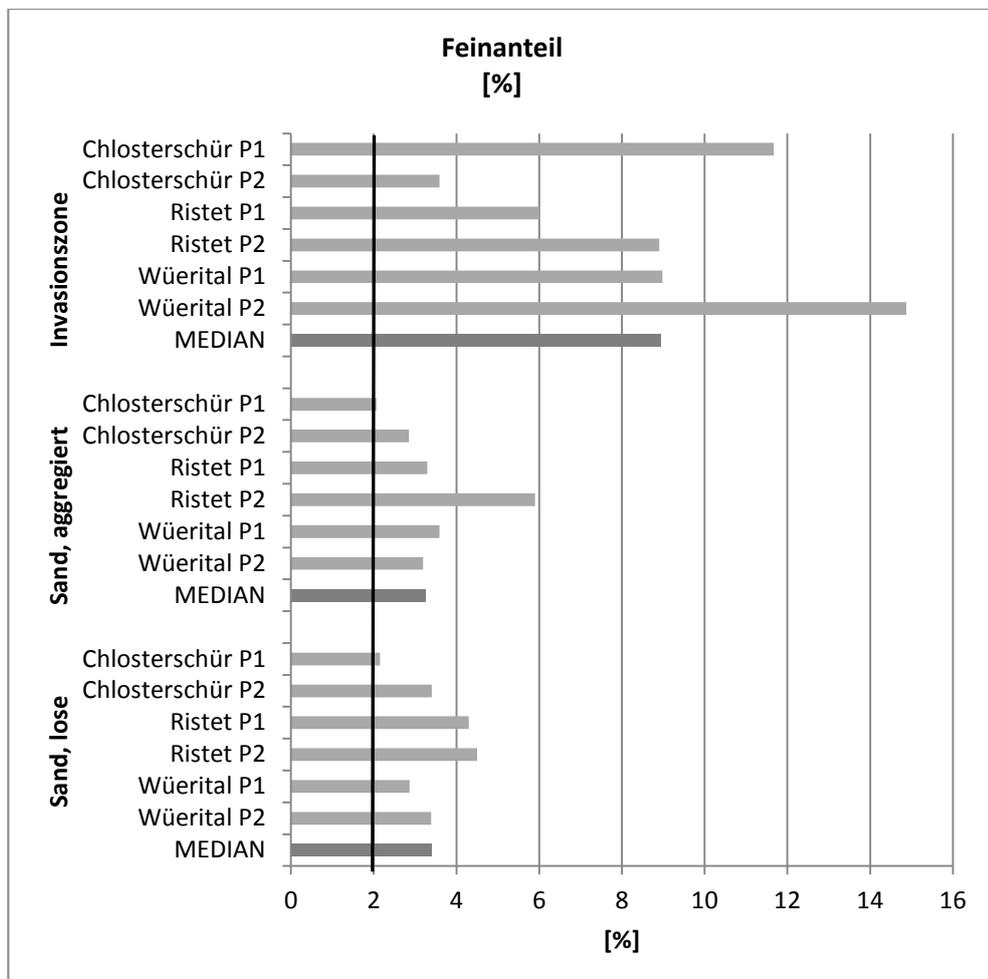


Abb. 5 Sandfilter der SABA Chlosterschür, Ristet und Wüerital, Feinanteil $<0.063\text{ mm}$, P1: stark belastet, P2: schwach belastet; Nullwert ca. 2%, Messwerte Ristet aus Ton- und Schluffanteil berechnet. Sedimentauflage nicht dargestellt. Die hohen Werte bei Chlosterschür P1 und Wüerital P2 könnten durch Baustellenabwasser verursacht sein.

Für die Verteilung der Schwermetalle siehe Diagramme in Kap.4.6.2 Ergebnisse der XRF-Messungen.

4.5.2 Bedeutung der Sedimentauflage

Die Schwermetalle sind in allen Anlagen vorwiegend in der Sedimentauflage konzentriert. In der Invasionszone nehmen sie bei Blei, Kupfer und Zink auf ca. 10% bis 20% des Wertes in der Sedimentauflage ab. Im darunterliegenden Sand gehen die Werte auf ca. 5% bis 15% zurück. Bei den Elementen Chrom und Nickel ist diese Abnahme nicht so ausgeprägt, was vermutlich an der geogenen Hintergrundbelastung des Sandes liegt.

Die Kohlenwasserstoffe (KW-Index C10 bis C40) und die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) sind ebenfalls in der Sedimentauflage konzentriert. In der Invasionszone gehen die Gehalte auf ca. 5% bis 10% zurück. Im darunter liegenden Sand liegen die KW und die PAK nahe bei oder unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Messungen in den SABA der Forchstrasse zeigten, dass die Höhe der Sedimentauflage massgeblich von der Belastung und der Betriebszeit abhängt. Der Sandfilter der SABA 1 ist bei ungefähr gleicher Betriebszeit wesentlich weiter entwickelt als derjenige von SABA 2. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei SABA 1 kein Absetzbecken vorgeschaltet und die hydraulische Belastung wesentlich höher ist, wodurch sich eine stärkere Sedimentauflage entwickelt hat.

Der Filter in SABA 1 müsste daher gegenüber SABA 2 theoretisch auch eine bessere Reinigungsleistung aufweisen. Die Ablaufkonzentrationen beider SABA sind jedoch gleich tief, was wiederum ein Hinweis darauf sein könnte, dass die Höhe der Sedimentauflage für die Reinigungsleistung weniger bedeutend ist.

Die Sedimentauflage ist, was die Sorption von gelösten Schadstoffen betrifft, mit den zufließenden Konzentrationen über längere Zeit betrachtet im Gleichgewicht. Dieses Gleichgewicht bildet sich bereits teilweise während des Zulaufs zur SABA und in den Schlammfassern aus. Man könnte daher vermuten, dass der Schadstoffrückhalt der gelösten Stoffe von der Höhe der Sedimentauflage unabhängig ist. Die Filtrationswirkung für Partikel und Kolloide dürfte hingegen mit der Höhe des Raumfilters zunehmen. Die Partikel werden zudem auch vom darunterliegenden Sand wirkungsvoll zurückgehalten. Hier besteht insofern noch eine Unsicherheit, da durch unsere Messungen die Wirkungen von Sedimentauflage und darunterliegendem Sand nicht unterschieden werden können.

Die Zulaufkonzentrationen sind jedoch bei Forch 1 und 2 unterschiedlich. Bei Forch 1 sind sie für Kupfer und Zink deutlich höher (2x so hoch). Dies würde dafür sprechen, dass die höhere Sedimentauflage auch eine bessere Reinigungswirkung aufweist. Dies bedeutet auch für den Unterhalt, dass die Schicht möglichst selten abgeschält werden sollte. [Berichte SABA Forch 1 und Forch 2, 62 und 63]

Die Vermutung, dass die Reinigungsleistung für partikulär eingetragene Schadstoffe in erster Linie durch die Sedimentauflage erbracht wird, hat sich bei den meisten Anlagen mit Sandfilter bestätigt. Je höher die Sedimentauflage ist, umso weniger werden die Schadstoffe in die Tiefe verlagert.

Dies bestätigen auch mehrere Angaben in der Literatur. So wurde festgestellt, dass die Partikel auch bei höherer Feststoffbelastung ohne Kolmation auf der Filteroberfläche eines Sandfilters zurückgehalten werden. Voraussetzung dafür sind ausreichend lange Abtrocknungszeiten der Filterfläche, damit das Sediment strukturiert und durchlässig bleibt. Weiter wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sogar vorteilhaft sei, die Sedimente auf die Filterflächen zu bringen.

Die Feststoffe des Strassenabflusses besitzen durch den Gehalt an Eisen eine hohe Schadstoffbindefähigkeit und können somit zur Reinigungsleistung gegenüber gelösten Schadstoffen beitragen. Dieser positive Einfluss auf den Stoffrückhalt wurde in mehreren Versuchen nachgewiesen. [18] Zum Thema Adsorption siehe auch Kap. 4.2.

4.5.3 Veränderung der Invasionszone

Die Invasionszone bildet sich durch eingelagerte Feinpartikel in der obersten Sandschicht unterhalb der Sedimentauflage. Die Untergrenze der Invasionszone stellt eine im Profil deutlich erkennbare Front dar, die langsam in die Tiefe wandert. Es ist anzunehmen, dass diese Ausdehnung der Invasionszone sich wegen abnehmender Durchlässigkeit während der Betriebszeit etwas verlangsamen wird. Aus der Bewegung der Invasionszone kann theoretisch die zu erwartende Lebensdauer eines Sandfilters geschätzt werden.

Im Sand unterhalb der Invasionszone haben die Schadstoffkonzentrationen nicht merklich zugenommen. Dies bedeutet, dass die Invasionszone eine relativ stabile Schadstofffront bildet und der Sand unterhalb relativ unbelastet bleibt. [Bericht SABA Wüerital, 79] und [Bericht SABA Chlosterschür, 67]

4.5.4 Sandschicht unterhalb der Invasionszone

Der Sand unterhalb der Invasionszone bleibt nicht unverändert. Er ist durch das Schilf dicht durchwurzelt und wird im Laufe der Betriebszeit zunehmend biologisch aktiv. Ein deutlicher Indikator dafür ist seine zunehmende Aggregation. Diese ist auf eingelagerte Feinpartikel, v.a. Ton, Kalk und organische Substanz zurückzuführen. Bei dieser OS handelt es sich vermutlich um extrazelluläre polymere Substanz (EPS) aus Wurzelexsudaten und Ausscheidungen von Mikroorganismen. Der OS-Gehalt nahm in SABA Chlosterschür in sechs Jahren gegenüber dem Referenzwert (Nullmessung) ungefähr um einen Faktor 3 bis Faktor 4 zu. [Bericht Chlosterschür und Neuwiesen, 67]

Frachten

Ein Vergleich der Frachten in der stark belasteten Zone zeigt für das Gesamtprofil eine Zunahme um den Faktor ca. 2.5 (Zink) bis ca. 4.3 (Kupfer) im gleichen Zeitraum. Interessant ist der Vergleich der einzelnen Schichten. Hier wird deutlich, dass Sedimentauflage und Invasionszone zwar die Hauptspeicher für die Schadstoffe sind; dass aber auch beträchtliche Mengen an Schadstoffen im Sand unter der Invasionszone eingelagert werden können.

Der scheinbare Widerspruch zu den oben erwähnten sehr geringen Konzentrationen im Sand unterhalb der Invasionszone (vgl. Kap. 4.5.3) besteht darin, dass dieser Sand im Vergleich zur Invasionszone ein erheblich grösseres Volumen aufweist. Die Frachten sind im Gegensatz zu den Konzentrationen volumenabhängig.

Eine Überprüfung der berechneten Frachten anhand einer Literaturangabe für Kupfer- und Zinkkonzentrationen im Strassenabwasser zeigt, dass die Werte plausibel sind. [Bericht Chlosterschür und Neuwiese, 67]

4.5.5 Adsorption von gelösten Stoffen im Sand

Die Partikel aus dem Strassenabwasser sind im Sand unterhalb der Invasionszone nur sehr schwer nachweisbar. Messungen des Feinanteils ergaben Werte im Bereich von ca. 2% bis 6%, bei einem Nullwert (vor Inbetriebnahme) von ca. 2%. Möglicherweise handelt es sich um Feinanteil aus dem Sand selbst, der durch die Wasserströmung verlagert wurde. Eine Messmethode, welche spezifisch Partikel aus dem Strassenabwasser nachweisen könnte, wäre sehr aufwendig, so dass wir lediglich auf eine Bestimmung des Feinanteils abstützen konnten.

Da aber, wie die Frachtberechnung oben zeigt, im Sand doch noch Schadstoffe eingelagert werden, besteht die Vermutung, dass dies durch Adsorption der gelösten Anteile an der EPS geschieht. Der Anteil an organischer Substanz beträgt ca. 1%, bei einem Nullwert von ca. 0.3%. Die Bildung von EPS in Filteranlagen zur Abwasserreinigung ist in der Literatur beschrieben, ebenso deren Fähigkeit, Stoffe zu adsorbieren, um sie so für die Mikroorganismen unschädlich zu machen. [2], [26], [50] und [51]

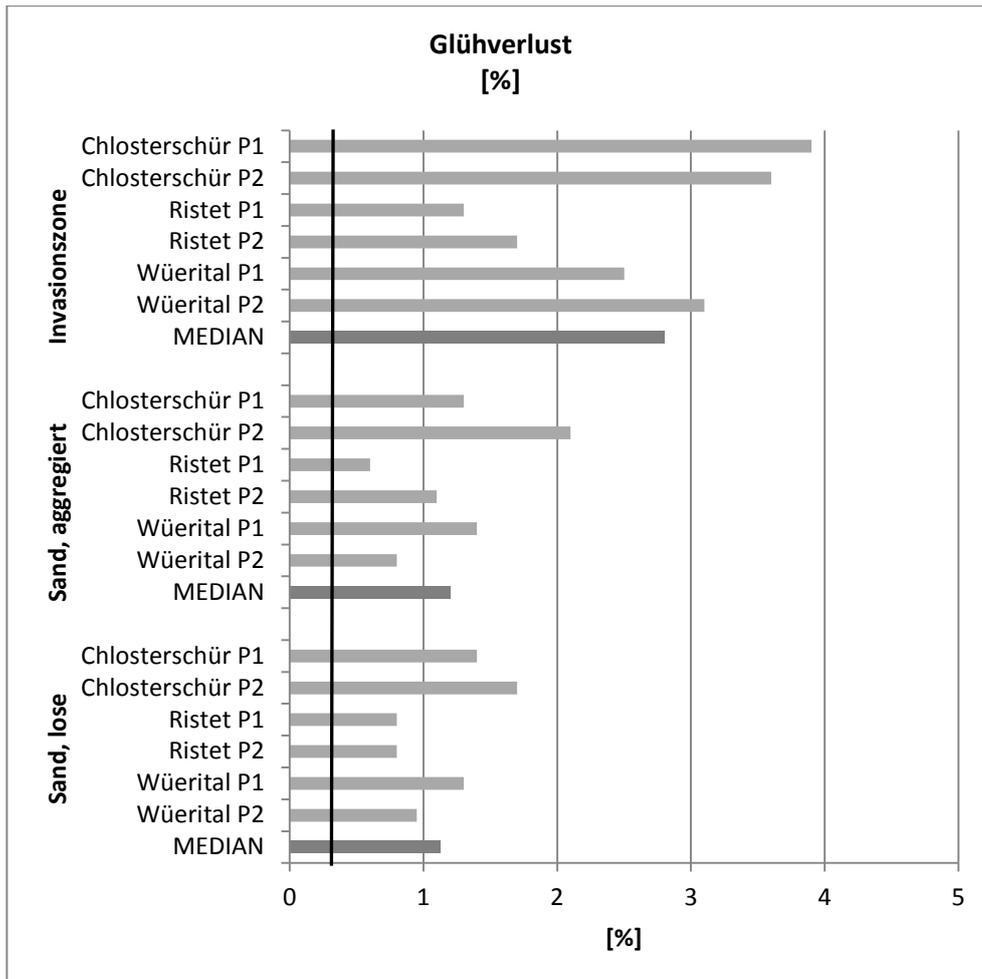


Abb. 6 Sandfilter der SABA Chlosterschür, Ristet und Wüerital, Gehalte an organischer Substanz als Glühverlust gemessen; P1: stark belastet, P2: schwach belastet, Nullwert ca.0.3%

Dieser Prozess würde erklären, warum gelöste Stoffe auch im Sand adsorbiert werden. In verschiedenen Literaturangaben wird erwähnt, dass sich die Adsorption nach einer gewissen „Einfahrzeit“ gewöhnlich verbessert, was auch mit der Bildung von Biofilmen zu tun haben kann. (siehe Kap. 4.2 Prozesse in Boden- und Sandfiltern). Um diese Prozesse für Sandfilter unter Praxisbedingungen eindeutig nachzuweisen, wären allerdings weitergehende und sehr aufwendige Untersuchungen erforderlich.

4.5.6 pH-Wert und Kalk

Der pH-Wert lag in allen Anlagen und in allen Schichten im alkalischen Bereich. Die Werte sind in der Sedimentauflage mit 7.2 bzw. 7.4 wegen der biologischen Aktivität am tiefsten und nehmen mit der Tiefe bis auf 7.5 bzw. 7.8 zu. Hohe pH-Werte sind wichtig, um die Mobilität der Schwermetalle einzuschränken und eine günstige Struktur des Filtersubstrats zu gewährleisten. Ein hoher pH-Wert wird durch den Kalk im Filtersubstrat (kalkhaltiger Sand) garantiert. Zudem wird mit dem Sediment aus dem Strassenabwasser auch laufend Kalk nachgeliefert, da Strassenstaub zumindest nördlich der Alpen in der Regel kalkhaltig ist. Kalk lag in allen untersuchten Filtern inkl. Sedimentauflage im Überschuss vor. Entsprechend ist auch davon auszugehen, dass die pH-Werte weiterhin hoch bleiben.

Allerdings ist zu beachten, dass der Kalkvorrat vom geologischen Ausgangsmaterial des Filtersubstrates und von der Region abhängt. Die Kalknachlieferung hängt somit vom

Einzugsgebiet der Anlage ab. Vor allem in Regionen mit kristallinem Gestein ist der Kalkversorgung erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

4.6 Typische Unterschiede in der Verlagerung der Schadstoffe

4.6.1 Vergleich der Tiefenprofile bei Boden- und Sandfiltern

Ein Vergleich der Tiefenprofile bei Kupfer, Zink und PAK bei den Anlagen Chlosterschür und Neuwiesen zeigt, dass im Bodenfilter die Konzentrationen unterhalb der obersten Schicht zwar schnell zurückgehen, dann mit der Tiefe weniger stark abnehmen als beim Sandfilter.

Bezüglich der Schwermetalle könnte dieses Muster verschiedene Ursachen haben. Wie in Kapitel 4.1.4 (Phasenverteilung der Schadstoffe) beschrieben, wurde in den Burgdorfer Versuchen ein Anteil von 80% von Cu und Zn gefunden, das an Partikel gebunden war und 20% der Schwermetallfracht war in Lösung. Es wäre also denkbar, dass im Sand nur die Partikel zurückgehalten wurden¹¹, während im Boden die gelösten Stoffe in der auf die Invasionszone folgenden Schicht durch Adsorption an Tonminerale ebenfalls zurückgehalten wurden und deshalb die Belastungen im Profil bei Bodenfiltern in eine grössere Tiefe hinunterreichen. Da aber einerseits keine erhöhten Zink und Kupferwerte im Abfluss von Sandfiltern gegenüber Bodenfiltern gemessen wurden (Kapitel 1) und da andererseits die PAK Werte sehr klar mit den Kupferwerten der Tiefenverteilungen korrelieren, ziehen wir folgende Schlussfolgerung: Die geringere Abnahme mit der Tiefe im Bodenfilter gegenüber dem Sandfilter ist darauf zurückzuführen, dass die Stoffe in einem Bodenfilter durch präferenziellen Fluss und durch biologische Aktivität eher in die Tiefe verlagert werden. Im Kiessand sind dann die Werte bei den Schwermetallen immer noch leicht höher als in vergleichbarer Tiefe im reinen Sandfilter. Dieses Phänomen der unterschiedlichen Tiefenprofile bei Boden- und Sandfilter wurde an allen untersuchten Anlagen beobachtet.

4.6.2 Ergebnisse der XRF-Messungen

Um die Untersuchung der Fließmuster und des präferenziellen Flusses (Kapitel 1, Tracerversuche) in eine Beziehung mit den Schadstoffkonzentrationen zu setzen, wurden an verschiedenen Anlagen Messungen mit einem mobilen XRF¹² gemacht. Diese Messungen sind weniger exakt und haben eine höhere Detektionsgrenze als Aufschlüsse und Messungen gemäss VBBo, ermöglichen aber eine Abschätzung der Grössenordnung der Belastungen und erlauben Vergleiche im Profil. Die Ergebnisse zeigen wie die unter Kapitel 4.6.1 beschriebenen Messungen systematische Unterschiede zwischen der Tiefenverteilung der Schadstoffe in Boden- und Sandfiltern.

Abb. 7 und Abb. 8 zeigen die Tiefenverteilung von Kupfer und Zink der Anlagen Neuwiesen und Wüerital. Wüerital (Inbetriebnahme 2009) ist eine Sandfilteranlage. Die Schadstoffe sind im oberen Teil des Profils (Sedimentauflage, Invasionszone) sehr hoch, nehmen aber mit der Tiefe stark ab. Die Anlage Neuwiesen ist ein Bodenfilter (Inbetriebnahme 2009) und zeigt eine deutlich stärkere Verlagerung von Zink. Dieses Bild ist typisch für die Unterschiede, die wir zwischen Boden- und Sandfiltern vorgefunden haben. Bei

¹¹ Wie oben gezeigt, ist trotzdem eine Adsorption der gelösten Stoffe an der EPs im Sand denkbar und auch wahrscheinlich.

¹² In den Profilen wurden in verschiedener Tiefe Proben genommen und mit einem mobilen XRF (engl. X-ray fluorescence spectroscopy; Röntgenfluoreszenzanalyse) die Gehalte verschiedener Schwermetalle gemessen (Niton XL3T 800 von ThermoScientific). Proben werden dabei mit Röntgenstrahlung hoher Intensität bestrahlt und die dadurch ausgelöste Röntgenfluoreszenzstrahlung wird gemessen, was einen Rückschluss auf die Zusammensetzung der Probe erlaubt.

Bodenfiltern scheint das Risiko eines Durchbruchs der Schadstoffe grundsätzlich grösser zu sein als bei Sandfilteranlagen.

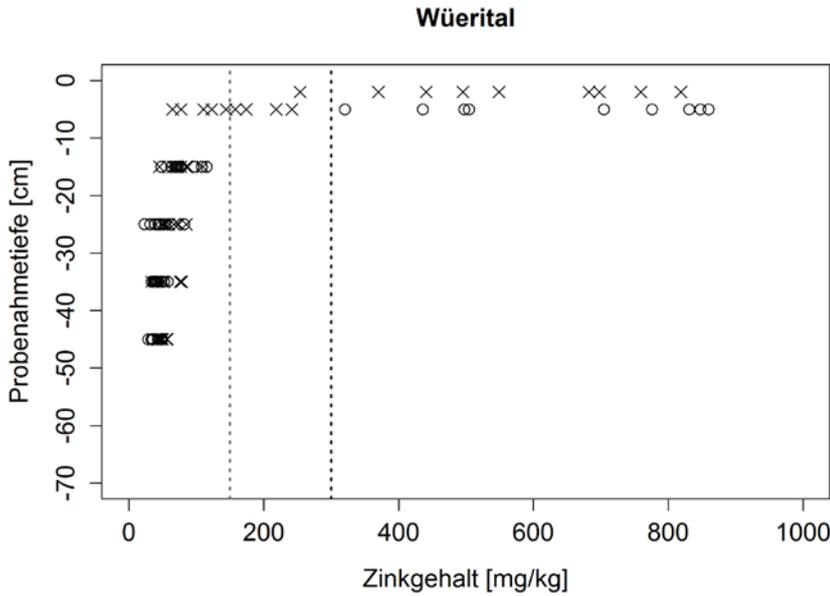


Abb. 7 Tiefenverteilung der Zinkmessungen mit dem mobilen XRF für die Anlage Wüerital (Sandfilter, Inbetriebnahme 2009) ×: Standort A nahe dem Zufluss. ○: Standort B weiter entfernt vom Zufluss. Die gestrichelten Linien zeigen den Richt- und Prüfwert nach VBBo und dienen zur Orientierung. Da die VBBo für SABA keine Gültigkeit hat und die Schwermetallmessung nach VBBo nicht mit XRF erfolgt sind die Werte für die Beurteilung der Verschmutzungssituation nicht relevant.

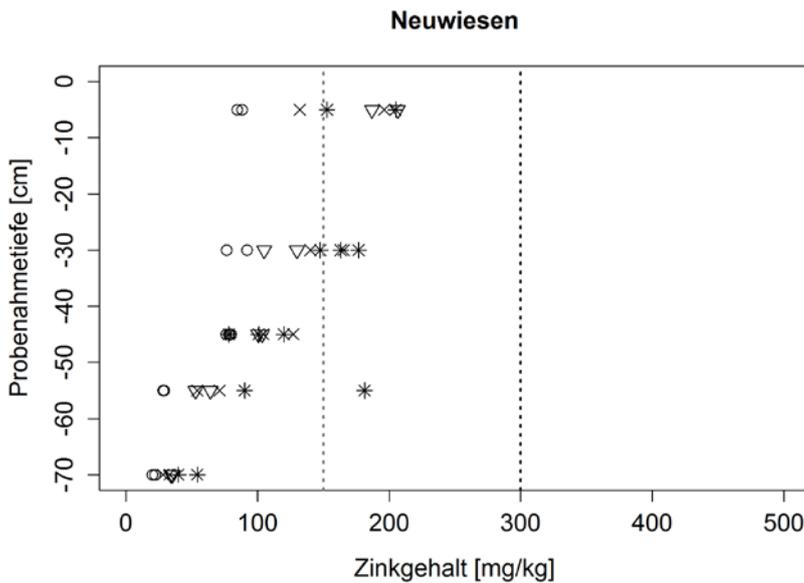


Abb. 8 Tiefenverteilung der Zinkmessungen mit dem mobilen XRF für die Anlage Neuwiesen (Bodenfilter, Inbetriebnahme 2009). Abstand zum Zufluss zunehmend über *, ∇, x zu o. Die gestrichelten Linien zeigen den Richt- und Prüfwert nach VBBo und dienen zur Orientierung. Da die VBBo für SABA keine Gültigkeit hat und die Schwermetallmessung nach VBBo nicht mit XRF erfolgt sind die Werte für die Beurteilung der Verschmutzungssituation nicht relevant.

4.6.3 Detailuntersuchungen am Standort Ellenwis

Am Standort Ellenwis (SABA Forch 6, 65) wurden zusätzliche Messungen durchgeführt, um den Unterschied zwischen Sand- und Bodenfilter bei gleicher Stofffracht zu untersuchen. Die SABA zeichnet sich dadurch aus, dass im RFB in Zuflussnähe Sand eingebaut wurde¹³, der dann weiter weg vom Zufluss von Boden abgelöst wird. Im Übergangsbereich gibt es einen Streifen, wo Boden über Sand zu finden ist. Dort konnte das Filterverhalten von Boden und Sand direkt verglichen werden, um den Zusammenhang zwischen präferenziellem Fluss, Invasionszonen und Schadstoffgehalten genauer zu untersuchen (Abb. 9). Um vertrauenswürdigere Aussagen zu machen, wurden hier zusätzliche XRF Messungen im Labor durchgeführt (Spectro XEPOS).



Abb. 9 Profilbild in Übergangsbereich von Sand- zu Bodenfilter in der SABA Ellenwis. An der Grenzschicht zwischen Boden und Sand ist die dunkel gefärbte Ablagerung von Partikeln aus dem Strassenabwasser zu sehen, welche sich normalerweise an der Bodenoberfläche als Invasionszone zeigt. (vgl. auch Erklärung in Anhang I)

Die folgende Abb. 10 zeigt die Tiefenverteilung der Zinkmessungen (Labor XRF) für Sand- und Bodenproben, die nahe des Abflusses direkt nebeneinander genommen wurden. Auch hier wurde Zink im Boden stärker in die Tiefe verlagert als im Sand. Um den Zusammenhang zwischen den abgelagerten Partikeln aus dem Strassenabwasser und den Schwermetallen genauer zu erfassen, wurden dunkel gefärbte Stellen aus der Invasionszone oder aus Makroporen und hell gefärbte Stellen ohne Partikel aus dem Strassenabwasser beprobt und ausgewertet. Die Auswertung zeigt signifikant höhere Zink- und Kupfergehalte an den dunkel gefärbten Stellen als im übrigen Boden (Abb. 11).

¹³ Sand und Boden liegen somit gleichen RFB im Zulaufbereich unmittelbar nebeneinander. Der Sand wurde erst später eingebaut, nachdem der Boden beim Zulauf erodiert war.

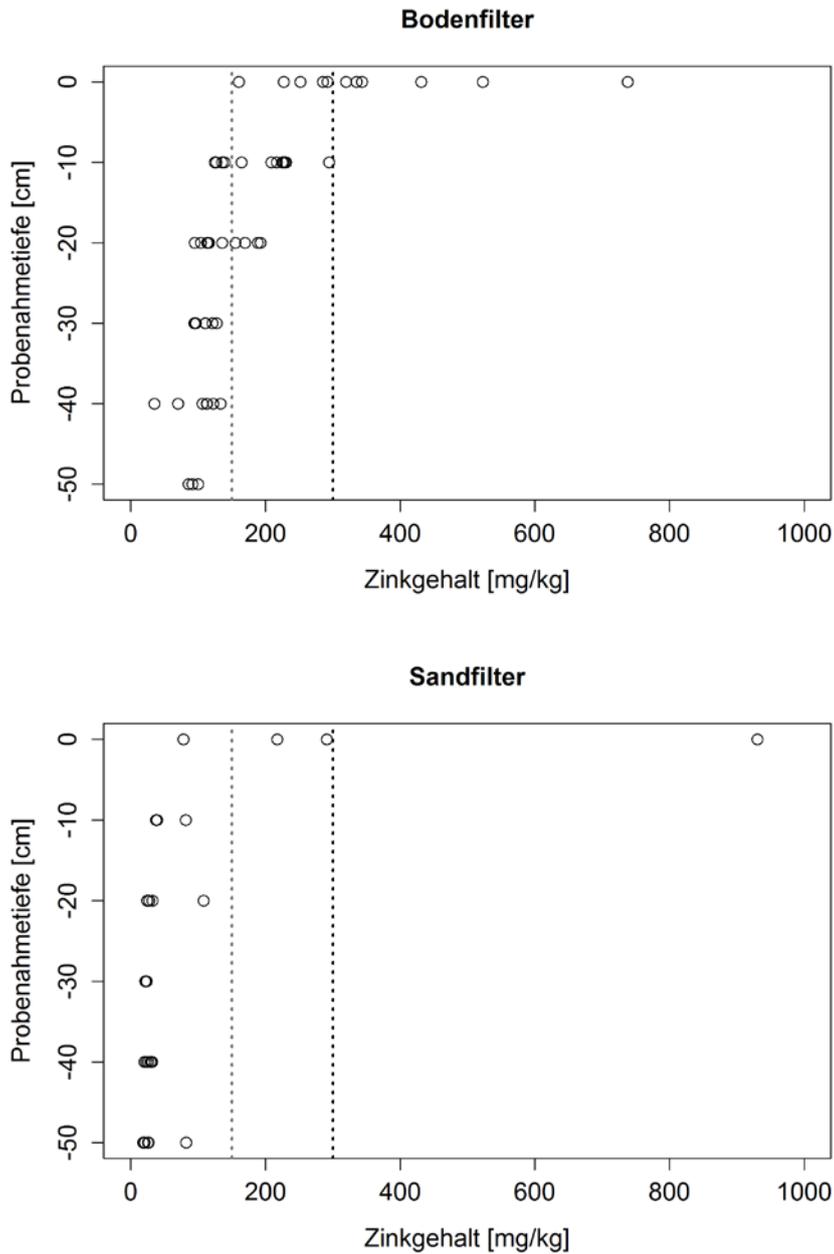


Abb. 10 Tiefenverteilung der Zinkmessungen (Labor) der Anlage Ellenwis (Forch 6). Untersuchungsstelle nahe beim Zufluss, Boden- und Sandprofile ca. ein Meter voneinander entfernt.

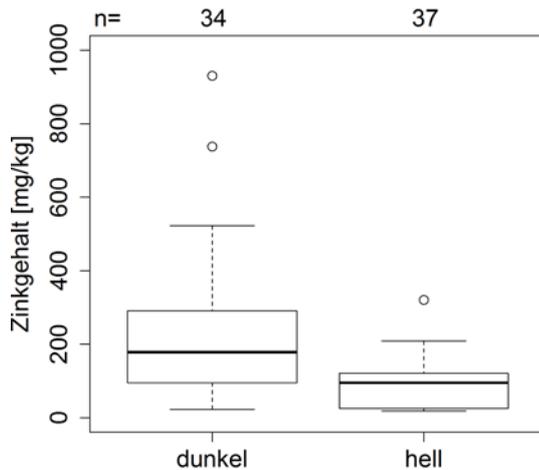


Abb. 11 Boxplots mir den Zinkwerten der von Auge als dunkel (=Invasionszone oder Makroporen) und als hell (übriger Boden) klassierten Bereiche.

4.7 Funktionsstörungen der Filter

4.7.1 Kolmatieren der Oberfläche

Hauptgrund: Fremdwasser

Das Beispiel SABA Chlosterschür zeigte, dass auch Sandfilter kolmatieren können. Einen wesentlichen Einfluss dürfte sicher das Fremdwasser mit hoher Sedimentfracht gehabt haben. [Bericht SABA Chlosterschür, 67]

Die Versickerungsleistung wird von der Beschaffenheit der obersten Schicht (oberste cm der Sedimentaflage) bestimmt. Diese Schicht muss also durch die biologische Aktivität laufend regeneriert werden, um eine Kolmation zu verhindern. Gelegentliches Kolmatieren in der Phase der Inbetriebnahme tritt meist nur vorübergehend auf und verschwindet wieder im Normalbetrieb.

Längerdauernder Einstau ist nachteilig für die Reinigungsleistung des Filters. Aufgrund der mangelnden Durchlüftung kann ein Sauerstoffdefizit entstehen. Die dadurch bedingten geringeren Abbauleistungen führen zur Anreicherung vor allem der partikulären organischen Substanz und möglicherweise zur verstärkten Bildung von EPS (extrazelluläre polymere Substanz), wodurch eine Kolmation eingeleitet werden kann. Filter sollten nur in Ausnahmesituationen und mit äusserster Vorsicht künstlich eingestaut werden.

Im Bodenfilter der SABA Hallmatt beispielsweise waren nach länger dauerndem Einstau wegen Fremdwassers keine lebenden Würmer und Insektenlarven mehr im Profil festzustellen. Das Fehlen der Würmer ist für das langfristige Funktionieren eines Bodenfilters nachteilig. [Bericht SABA Hallmatt, 69]

Das Lockern der Oberfläche bei Kolmation bringt nur kurzfristige Besserung, solange die Ursache nicht behoben ist. [Bericht Chlosterschür, 67]

Probleme mit Fremdwasser oder mit der Fremdwasserweiche gab/gibt es bei:

- SABA Bäckental: sehr viel Fremdwasser, Fremdwasserweiche mit Stöpsel und Feder wurde nachträglich eingebaut.
- SABA Wüerital: viel Fremdwasser, Fremdwasserweiche wurde nachträglich installiert
- SABA Ristet: wenig Fremdwasser, bisher lediglich Kolmationserscheinungen in Zulaufnähe, keine Probleme für die Funktion der SABA, da Filterbecken überdimensioniert sind
- SABA Reppisch: Abtrennung des Bergwassers aus dem Eggraintunnel war erforderlich

- SABA Chlosterschür: zeitweise wurde Bachwasser zur SABA geleitet, dieses konnte später abgetrennt werden; Bypass für verbliebenes Fremdwasser musste besser reguliert werden
- SABA Thur-Süd: viel Fremdwasser, Abtrennung mit Schwimmerklappe funktioniert nicht richtig.
- SABA an der Forchautostrasse: Bei 4 der 6 SABA wurde eine Fremdwasserweiche installiert (Bypass mit Hahn).
- SABA Talacher: Bachwasser fliesst zur SABA, Abtrennung mit Weiche nach Kiesfilter, aber vor Bodenfilter.
- SABA Hallmatt

4.7.2 Kolmatieren tieferer Schichten

Im RFB Chlosterschür wurde die Ausfällung von Eisenoxyd in ca. 10 cm Tiefe an der Untergrenze der Invasionsschicht beobachtet. Die Ursache bildete vermutlich eine Überlastung mit Kolmatieren der Oberfläche und anaeroben Bedingungen im Filter. Da die Ursache behoben werden konnte, scheinen diese Eisenkonkretionen kein grösseres Problem zu sein. Die Schilfrhizome vermochten diese Schicht zu durchstossen und zu lockern. Dank der Schilfstreu blieb auch die Oberfläche immer strukturiert und porös. Voraussetzung dazu ist, dass der Filter regelmässig trocken fallen kann. [Bericht SABA Neuwiesen und Chlosterschür, 67]

In kolmatierenden Anlagen kommt es zu einer verstärkten Einengung des Porenraums durch die Bildung von EPS und durch nicht stoffwechselaktive Biomasse. Die Messung des Glühverlustes von Bodenproben zeigt, dass es zu einer Anreicherung von organischer Substanz kommt.

4.8 Erkenntnisse

Sandfilter

Unsere Untersuchungen und die Ergebnisse der Literaturstudie zeigen, dass alle Sandfilter mit Schilfbewuchs Partikel aus dem Strassenabwasser zuverlässig zurückhalten. Sie sind in dieser Hinsicht den Bodenfiltern ganz offensichtlich überlegen. Weiter gibt es Hinweise, dass auch die gelösten Stoffe in Sandfiltern zumindest teilweise adsorbiert werden. Die organische Substanz und die biologische Aktivität nach einer gewissen Einwirkzeit des Filters scheint hier eine wichtige Rolle zu spielen.

Sandfilter zeigten generell eine geringe Neigung zu kolmatieren, wenn der Schilfbestand gut entwickelt und das RFB nicht durch Fremdwasser überlastet war.

Bodenfilter

Bei den Bodenfiltern werden die Partikel und damit auch die adsorbierten Schadstoffe schneller in grössere Tiefen verfrachtet und dort im Unterboden oder im Kiessand eingelagert. Frühere Untersuchungen zeigten, dass eine ca. 30 cm mächtige Schicht Oberboden nicht ausreicht, um ausreichend Filter- und Sorptionskapazität zur Verfügung zu stellen. Bei Bodenfiltern ist daher in der Regel eine Schichtung von mehreren Substraten erforderlich, z.B. Ober-/Unterboden oder Oberboden/Kiessand. Dieser Aufbau aus mehreren Schichten ist problematisch, weil an den Schichtgrenzen in der Regel die Porenkontinuität gestört ist. Damit verbunden sind unterschiedliche Saugspannungen, was unerwünschte Phänomene wie Kolmationsgefahr, Lateralfloss, und präferenziellen Fluss bedingen kann. Bei vielen der untersuchten Bodenfilter war ganz offensichtlich präferenzzieller Fluss ein Problem.

5 Hydraulik I: Tracerversuche und präferenzieller Fluss

5.1 Präferenzieller Fluss

Phänomen

Das Phänomen des präferenziellen Flusses betrifft fast ausnahmslos Bodenfilter und ist der wichtigste Einwand gegen die Verwendung von Boden als Filtersubstrat. Dieses Phänomen tritt aber auch in jedem natürlichen Boden auf. Es hat zur Folge, dass Stoffe unerwartet schnell in grössere Tiefen verfrachtet werden können. Präferenzieller Fluss wird vor allem bei einem Bodenzustand nahe der Wassersättigung initiiert [52]. Bei geringen Niederschlagsmengen ist das normalerweise nicht der Fall. Wobei die SABA natürlich die Niederschläge aus einem grösseren Einzugsgebiet auf eine kleinere Fläche konzentriert, sodass bei geringerer Niederschlagsrate ein Infiltrationsregime mit höherer Sättigung erreicht wird.

Der Transport von Stoffen im Boden erfolgt aber nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich sehr heterogen: Je nach Sättigungszustand des Bodens und der Intensität eines Niederschlagsereignisses können unterschiedliche Transportmechanismen dominieren. Für quantitative Aussagen zu Bodenfiltern müssen daher Referenzwerte bekannt sein. Weiter müssen die für die Stoffverlagerung wesentlichen Prozesse bekannt sein.

Wichtig ist die Feststellung, dass präferenzielle Fliesswege ein natürliches Phänomen sind. Präferenzieller Fluss ist notwendig, damit grosse Wassermengen schnell versickern können und der Boden nicht verschlämmt und dauerhaft durchlässig bleibt.

Faktoren

Präferenzieller Fluss kann sehr unterschiedliche Ursachen haben. Das Phänomen tritt vor allem bei relativ hohen Niederschlagsintensitäten auf. Oft sind Makrostrukturen wie Wurmgänge, Risse, Aggregatsgrenzflächen oder Wurzelkanäle beteiligt. Daneben führt auch schlechte Benetzbarkeit einzelner Bereiche zu heterogenem Wasserfluss, beispielsweise in trockenen, sandigen Böden oder in Horizonten mit viel organischem Material [53]. Das Mikorelief kann ebenfalls dazu beitragen, dass Wasser nur an relativ wenigen Stellen infiltriert und in die Tiefe geleitet wird. Unter Umständen können in der obersten Bodenschicht laterale Flüsse auftreten, welche das Wasser zu den bevorzugten Fliessbereichen führen [59], [56]. Schliesslich spielen auch Schichtgrenzen eine Rolle. Solche wirken oft stauend und können dadurch ebenfalls Lateralfliess oder auch unstabiler, fingerartiger Fluss bewirken. [Bericht SABA Buchrain, 66]

Besonders ausgeprägt ist der präferenzielle Fluss demnach bei hohem Niederschlag und lehmigem Boden sowie bei sandigem Boden bei Trockenheit. Auch Makrostrukturen (Wurmlöcher, Risse, Wurzelkanäle) sind für die Stoffverlagerung entscheidend.

Prozesse

Von Bedeutung sind die Wechselwirkungen der Schadstoffe mit festen Bodenbestandteilen (Sorptions) sowie mit Organismen (Abbau). Durch eine Anlagerung (Adsorption) an Bodenpartikel oder eine Aufnahme (Adsorption) in organische Bestandteile des Bodens (manchmal auch als «*partitioning*» bezeichnet) kann die Verlagerung der Schadstoffe in die Tiefe u. U. stark verzögert werden. In diesem Zusammenhang wird auch vom Retardationsfaktor gesprochen.

Fliessmuster

Die Variabilität der beobachteten Fliessmuster in natürlichen Böden ist sehr gross. Nur in Ausnahmefällen wird eine homogene Infiltrationsfront beobachtet. In weitaus den meisten Fällen erfolgt der Wasserfluss sehr heterogen.

Für gelöstes Phosphat wiesen Stamm et al. [45] einen schnellen Durchbruch in Drainagen unter natürlichen Niederschlagsbedingungen nach. Dies ist erstaunlich, gilt doch Phosphat wegen der sehr grossen Sorptionskapazität der Böden als praktisch immobil. Offenbar kommt die potentielle Adsorptionskapazität des Bodens beim Auftreten von prä-

ferenziellem Fluss nicht voll zum Tragen, weil die gelösten Stoffe während des Makroporenflusses nicht in direkten Kontakt mit der Bodenmatrix kommen. Diese Versuchsergebnisse sind jedoch nicht ohne weiteres auf RFB übertragbar, da die Filterschichten im RFB nicht unbedingt die Eigenschaften von natürlichen Böden aufweisen und die hydraulische Belastung ungleich höher als in der Natur ist.

Fazit

Ursachen für präferenzielle Fliesswege sind demnach ungeeignete Bodenart, hohe Niederschlagsraten (was in RFB auch so vorgesehen ist.), Makrostrukturen wie Wurmgänge, Risse, Aggregatgrenzflächen, schlechte Benetzbarkeit, viel organisches Material, Schichtgrenzen, geneigte Schichten und unregelmässige Bodenoberfläche. Ausgeprägter präferenzieller Fluss konnte bei Anlagen mit Bodenfiltern beobachtet werden. Die Gründe dafür waren ungenügende Setzung des Oberbodens (SABA Neuwiesen, 67), ungünstige Bodenstruktur im Unterboden (SABA Forch 6, 65) und präferenzieller Fluss entlang Betonwänden (SABA EKZ Zugerland, 68 und SABA Buchrain, 66).

5.2 Methoden der Feldversuche

Visualisierung der Wasserinfiltration

Um die Fliesswege des Wassers in Versickerungsanlagen mit Boden- und Sandfiltern zu untersuchen, wurde Wasser infiltriert, das mit dem Farbtracer Acetylen Blau AE 85 (Konzentration 4 g/l) gefärbt war. Dieser ungiftige Tracer ist gut für die Untersuchung von Infiltrationsmustern geeignet, weil er einerseits mobil ist und den Wasserfluss im Boden nachzeichnet, andererseits bietet er durch seine blaue Farbe an den meisten Standorten einen guten Kontrast zur Hintergrundfarbe des Bodens [23]. Infiltrationsmuster zeigen den Einfluss von Bodenstruktur auf den Wasser- und Stofftransport [38], [45]. Im Anschluss an die Infiltration wurde ein senkrechtes Bodenprofil aufgedigelt, präpariert und fotografiert.

Die Versuche wurden auf RFB mit Boden- und Sandfiltern unterschiedlichen Alters durchgeführt. Es wurde bei jeder Anlage eine Stelle nahe beim Zufluss (je nach Situation ca. 3 bis 5 m Distanz, stark belastete Zone) und eine Stelle weiter vom Zufluss (schwach belastete Zone) entfernt beprobt. Das Ziel war, mit Hilfe der Infiltrationsmuster Unterschiede zwischen der Versickerung in Boden- und Sandfiltern aufzuzeigen und diese mit der Sickerleistung des Substrats und der Schadstoffverlagerung in Beziehung zu setzen. Ausserdem war von Interesse, ob sich die Wasserinfiltration mit dem Alter der Anlage verändert und ob sich verschiedene Stellen innerhalb einer Anlage stark unterscheiden.

Messung der gesättigten Leitfähigkeit

Im Zuge der Tracerinfiltration wurde die gesättigte Wasserleitfähigkeit k_{sat} nach Darcy bei konstanter Druckhöhe gemessen [1]. Pro Fläche wurden drei Infiltrationsmessungen gemacht, standardmässig mit konstantem Überstau [58], in Einzelfällen zusätzlich mit Einzel- oder Doppelring Infiltration. Um den Effekt der Kolmations-schicht an der Oberfläche von Sandfiltern nicht zu vernachlässigen, wurden die Boyle-Mariott'schen Flaschen, die für die Infiltration benutzt wurden, um einen konstanten Überstau zu gewährleisten, in einen in die obersten Zentimeter des Bodens eingeschlagenen Probenahmezylinder gestellt und nicht in ein zylinderförmiges Loch im Boden.

Die Punktmessungen zeigen die Variabilität innerhalb einer Anlage auf. Die hydraulische Leistung einer SABA als Ganzes (Kapitel 6) hängt von der Summe der Wasserleitfähigkeiten an jeder Stelle der Anlage ab und lässt sich aus den Punktmessungen nur bedingt abschätzen.



Abb. 12 Infiltration mit der Tracerlösung.

Schwermetallbestimmung mit XRF

Die in Kapitel 4.6.2 beschriebenen XRF Messungen wurden an Proben aus den Fließmusterprofilen gemacht. Sie sollen helfen, den Zusammenhang zwischen Infiltrationsregime und Schadstoffverlagerung zu untersuchen.

5.3 Untersuchungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit von Boden- und Sandfiltern

Wie Abb. 13 zeigt, liegen die Messwerte für die gesättigte Leitfähigkeit k_{sat} zwischen 10^{-4} und 10^{-6} m/sec. Die Sandfilter zeigen eine grössere Streuung der Messwerte als die Bodenfilter. Die jüngeren Anlagen scheinen etwas höhere k_{sat} Werte zu haben als die älteren Anlagen. Für unverdichtete, gewachsene Sand- und Lehmböden sind das typische Messwerte. Für Versickerungsanlagen wird gemäss des Dokuments „Regenwasserentsorgung - Richtlinie zur Versickerung, Retention und Ableitung von Niederschlagswasser in Siedlungsgebieten“ [6] für fachgerecht eingebrachtes Bodenmaterial eine spezifische Sickerleistung im Bereich von $2 \cdot 10^{-5}$ m/s angenommen. Die spezifische Leitfähigkeit entspricht der Hälfte der gesättigten Leitfähigkeit k_{sat} nach Darcy und wird als passender Parameter für Versickerungsanlagen angegeben, weil in solchen nicht von gesättigten Verhältnissen ausgegangen werde. Die spezifische Sickerleistung von $2 \cdot 10^{-5}$ m/s, welche einem k_{sat} Wert von $4 \cdot 10^{-5}$ m/s entsprechen würde, liegt in den meisten der untersuchten Anlagen in etwa vor.

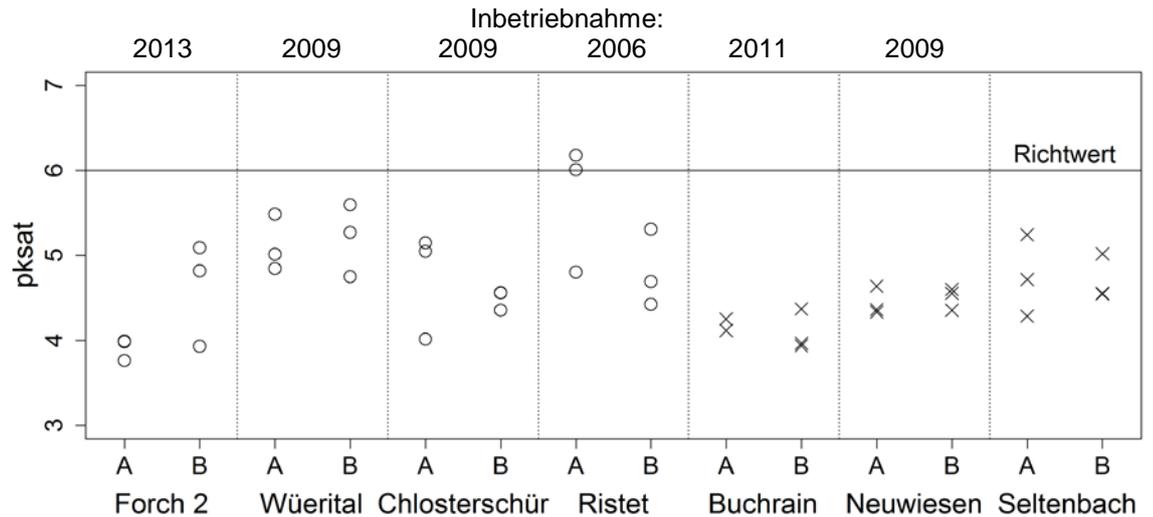


Abb. 13 Punktueller Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_{sat} nach Darcy dargestellt in $pk_{\text{sat}} = -\log(k_{\text{sat}})$ für die untersuchten Anlagen. O: Sandfilter, x: Bodenfilter, Anordnung nach Inbetriebnahme. Plot B liegt weiter entfernt vom Zufluss und ist daher eher weniger oft überflutet und weniger stark mit Schadstoffen belastet als Plot A.

Für Böden wurde in der „Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen“ der Bodenschutzfachstellen [5] ein Richtwert von 10^{-6} m/sec und ein Massnahmenwert von 10^{-7} m/s vorgeschlagen. Die gemachten Messungen zeigen mit einer Ausnahme bedeutend höhere Leitfähigkeiten, was zeigt, dass sowohl die Sand, als auch die Bodenfilter nicht verdichtet sind und gute Durchlässigkeiten aufweisen.

Einzig die SABA Ristet zeigt in der Nähe des Zulaufs sehr geringe Leitfähigkeiten. (siehe Abb. 13) Vergleiche mit der eher hohen Gesamtsickerleistung der Anlage (Kapitel 6.2), zeigen hier einen Widerspruch. An der Messstelle Ristet A schien es im Untergrund eine stauende Schicht zu geben, der Abfluss war ausgesprochen gehemmt. Zum Zeitpunkt der Messungen wurde beobachtet, dass in der Nähe des Zulaufs oberflächlich Wasser gestaut war. Die Messungen wurden möglichst nahe, aber ausserhalb dieses Bereichs gemacht. Es dürften also tatsächlich stellenweise tiefe Leitfähigkeiten vorhanden sein. Beim Aufgraben der Infiltrationsstellen wurden ab ca. 30 cm Tiefe wieder trockenere Schichten vorgefunden, sodass eindeutig auf Stauwasser geschlossen werden konnte. An anderen Stellen der Anlage wurden aber normal hohe Leitfähigkeiten gemessen (Abb. 13), welche die Versickerungsleistung der gesamten Anlage offenbar kompensieren.

5.4 Effekt des präferenziellen Flusses in Boden und Sandfiltern

5.4.1 Unterschiede zwischen Boden- und Sandfiltern

Die Tracerversuche zeigten, dass Bodenfilter grundsätzlich eher präferenzielle Fließwege aufweisen als Sandfilter. Exemplarisch kann das am Versuch in der Anlage Ellenwis (Forch 6) gezeigt werden, bei der im Zuflussbereich Sand eingebaut wurde, der dann nach einigen Metern von Boden überdeckt wird (siehe auch Kapitel 4.6.3). Der Tracer wurde auf Boden appliziert, unter dem sich noch eine Sandschicht befindet. Das Infiltrationsmuster zeigt deutlich präferenziellen Fluss im Boden, der bei Erreichen der Sandschicht von homogenem Fluss abgelöst wird (Abb. 14). Gleichzeitig ist nicht nur an der Oberfläche die dunkel gefärbte Invasionszone zu erkennen, sondern auch am Übergang von der Boden- zur Sandschicht. Dunklere Färbungen sind auch in den Makroporen der Bodenschicht zu finden, welche auch als präferenzielle Fließwege wirksam sind (Abb. 14).

Die Anlage Ellenwis wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit zusätzlich beprobt und es wurden nebst Messungen mit dem mobilen XRF auch im Labor XRF Messungen gemacht. Die Ergebnisse wurden bereits in Kapitel 4.6.2 erläutert und zeigen signifikant höhere Gehalte an Zn in den von Auge als dunkel klassierten Bereichen als in den als hell eingestufteten Bereichen.

Präferenzialer Fluss kann also auch in SABA zu einem stärkeren Tiefentransport von Schadstoffen führen. Da die Schadstoffe im Falle von Strassenabwasser stark an die Partikel gebunden sind [57], werden sie von der Sandschicht besser zurückgehalten als von der Bodenschicht. Sandfilter, die zwar keine Tonminerale für die chemische Adsorption gelöster Stoffe enthalten, scheinen für den Einsatz in SABA gut geeignet zu sein, da sie durch ihre Korngrößen die physikalische Filterung gewährleisten und im Wesentlichen gleichmässiger durchflossen werden als Bodenfilter.



Abb. 14 Fließmusterbeispiel aus der Anlage Ellenwis (Forch 6).
(Erklärung im Anhang I)

5.4.2 Einfluss des Alters der Anlagen auf die Fließmuster

Der Vergleich von Infiltrationsmustern von Sandfilteranlagen unterschiedlichen Alters zeigt, dass die Infiltration mit den Jahren heterogener wird. Gründe dafür können biologische Aktivität (Wurzeln, Bodenlebewesen) oder ganz allgemein die Strukturbildung sein (Abb. 15). Hinweise für die Entwicklung einer Aggregatstruktur in der Sandschicht wurden in den Untersuchungen nicht gefunden. Dafür wurde in Sandfiltern eine zunehmende Durchwurzelung festgestellt, welche mit der Zunahme der Heterogenität der Fließmuster einhergeht.

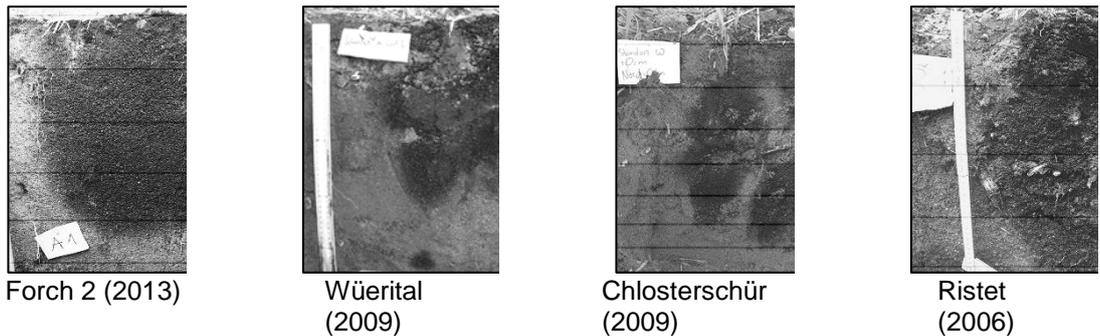


Abb. 15 Unterschiedliche Fließmuster von Sandfilter-Anlagen verschiedenen Alters.

Auch bei den Bodenfiltern nimmt die Durchwurzelung zu (Abb. 16). Das Auftreten von präferenziellem Fluss scheint hier aber mit dem Alter der Anlage nicht zuzunehmen.

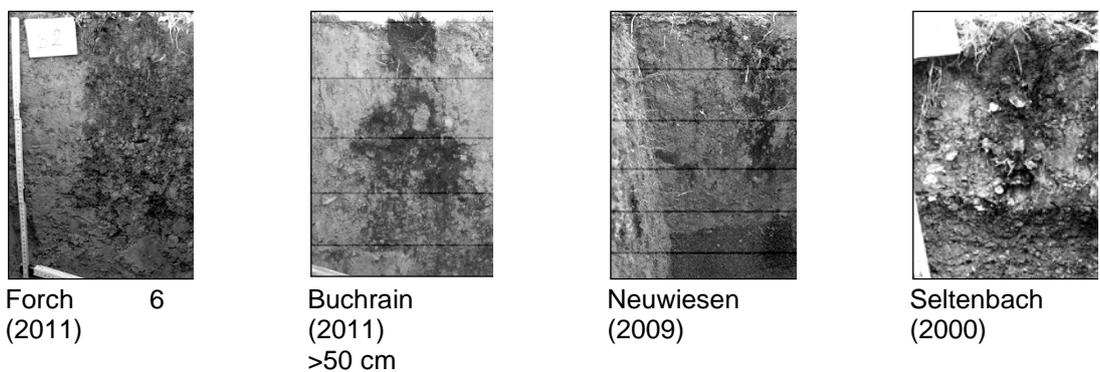


Abb. 16 Unterschiedliche Fließmuster von Bodenfilter-Anlagen verschiedenen Alters (Jahr der Inbetriebnahme).

In der Anlage Seltenbach wurde eine besonders starke Durchwurzelung mit Schilfwurzeln gefunden (Abb. 16, rechts). Die Anlage besteht aus einer Bodenschicht von 20 cm Mächtigkeit, gefolgt von einer Schicht aus Kiessand von 70 cm (Stammdatenblatt). Das Fließmusterbild aus dem Schilfbereich gibt keine eindeutigen Hinweise darauf, dass die Wurzeln selber als präferenzielle Fließwege gewirkt haben. Es ist aber deutlich zu sehen, dass die Schilfrhizome, welche üblicherweise horizontal wachsen und neu austreiben, die Tiefe von 20-30 cm, in der die Bodenschicht von Kiessand abgelöst wird, durchaus erreichen. In Schilfwurzeln gibt es Luftkanäle (Aerenchym), welche für die Sauerstoffversorgung der unterirdischen Pflanzenteile zuständig sind. Im abgestorbenen und verrottenden Zustand könnten Schilfwurzeln Makroporen bilden, welche präferenziellen Fluss begünstigen.

Sie SABA Seltenbach zeigt einen augenfälligen Unterschied zwischen dem Fließmusterbild an der Stelle A (nahe beim Zulauf, häufiger unter Wasser, höhere Schadstofffracht, Schilfbewuchs) und Stelle B (weiter von Zufluss entfernt, weniger Überstau, Grasbewuchs, kleinere Schadstofffracht) (Abb. 17). Während an der Stelle A eine starke Durchwurzelung und ein heterogenes Fließmuster gefunden wurden, ist die Durchwurzelung an Standort B kaum sichtbar und die Infiltration des Wassers sehr homogen.

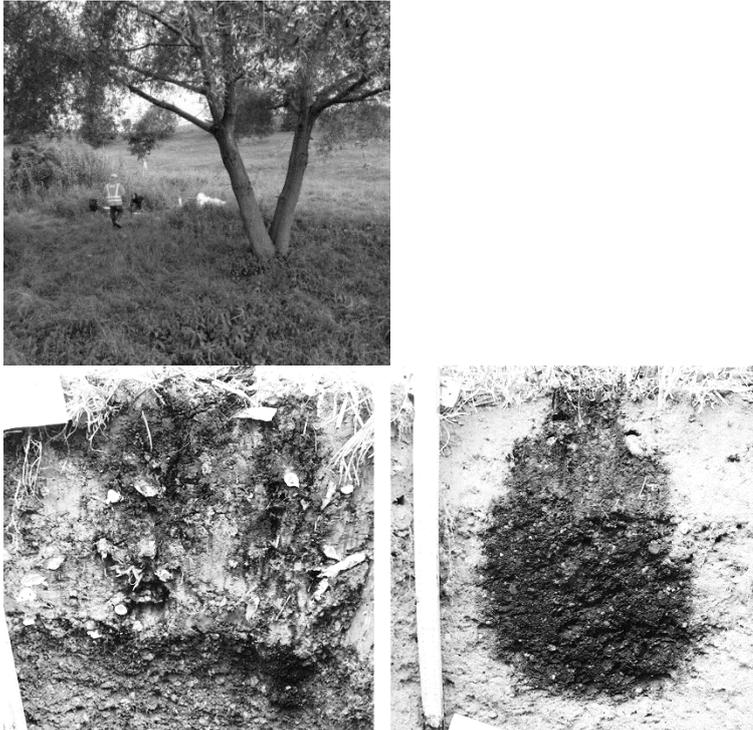


Abb. 17 Anlage Seltenbach. Unterschiedliche Infiltration im Bereich nahe des Zuflusses (Mitte) und im Bereich weiter entfernt (rechts). Im Bild oben ist zu sehen, dass im Filterbecken ein Baum steht.

Die Messungen mit dem mobilen XRF haben für den Standort Seltenbach an der Stelle A eine Abnahme der Zink Gehalte über die ersten 20 cm des Bodens ergeben, gefolgt von einer Zunahme in einer Tiefe von 30 cm (Abb. 18).

Dies zeigt, dass der präferenzielle Fluss tatsächlich zu einem Durchbruch der Schadstoffe bis in die Kiessandschicht geführt hat. Das ist ungünstig, denn der Kiessand ist aufgrund seiner Porengrößenverteilung in seiner mechanischen Filterwirkung weniger effektiv.

Die SABA Seltenbach wurde 2000 in Betrieb genommen und ist somit eine der älteren Anlagen. Im Vergleich mit anderen Anlagen, ist hier die Bodenschicht mit 0.2 m nur gering mächtig. Um die Filterwirkung der Anlage zu gewährleisten, sollte die Mächtigkeit der obersten Filterschicht (Boden oder Sand) deutlich grösser sein, als die Tiefe der Schilfrhizome. Hier stand zudem zum Zeitpunkt unseres Feldversuchs ein Baum inmitten des RFB, was auf jeden Fall zu vermeiden wäre (Abb. 17, links).

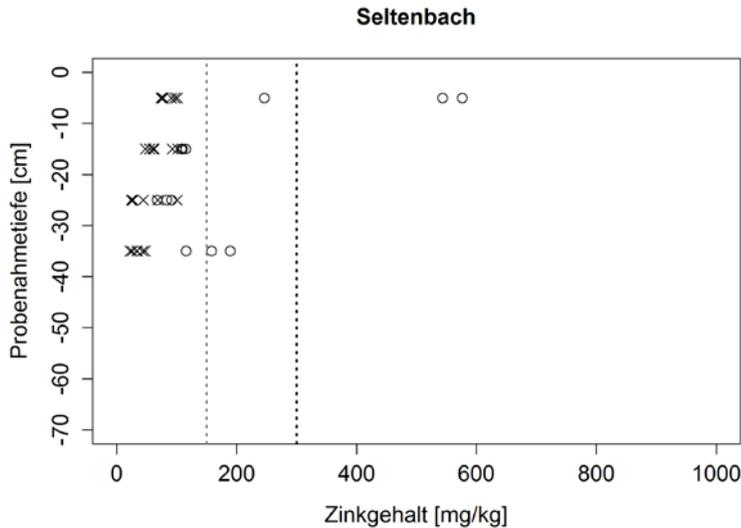


Abb. 18 Messwerte der Zinkkonzentrationen (mobiles XRF) für die Anlage Seltenbach. O: Standort A nahe dem Zufluss. x: Standort B weiter entfernt vom Zufluss.

5.5 Erkenntnisse

Aus den Tracerversuchen und den damit verbundenen Leitfähigkeits- und Schadstoffmessungen (Kap. 4.6.2) ziehen wir folgendes Fazit:

- Die Punktmessungen der Leitfähigkeiten weisen wie bei natürlichen Böden üblich eine gewisse Heterogenität auf, zeigen aber im Wesentlichen gute Durchlässigkeiten im angestrebten Bereich. Es gibt Hinweise auf eine leichte Abnahme der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} mit zunehmender Betriebsdauer der Anlagen.
- Die Tracerversuche zeigen mehr präferenziellen Fluss in Bodenfiltern als in Sandfiltern. Dieser geht einher mit einer stärkeren Verlagerung von Partikeln und Schwermetallen.
- Auch Sandfilter entwickeln mit zunehmender Betriebsdauer heterogenere Infiltrationsmuster. Diese Heterogenität geht mit einer Zunahme der Durchwurzelung einher. Bei sehr gering mächtigen Boden- oder Sandschichten erreichen die Schilfwurzeln unter Umständen die Grenze zum Kiessand. Da verrottende Schilfwurzeln längerfristig zu zusätzlichen präferenziellem Fluss führen könnten, empfehlen wir, die oberste Boden- oder Sandschicht bedeutend mächtiger zu machen als die erwartete Tiefe der Schilfwurzeln. Schilfrhizome können sich bis in 2 m Tiefe erstrecken [39].
- Grundsätzlich sind die Sandfilter gut geeignet, um die meist partikulär vorliegenden Schadstoffe, welche in Strassenabwasser-Behandlungsanlagen vorliegen, herauszufiltern. Die mechanische Filterung ist im Sand effektiver als im Boden, da der Boden eher präferenzielle Fließwege aufweist. Die Möglichkeit der Adsorption gelöster Stoffe an Tonminerale, welche bei Bodenfiltern stärker ausgeprägt wäre, bietet offenbar keine zusätzlichen Vorteile.

Bei der Bewertung der Messmethoden sind auch die Wiederholbarkeit in Zeitreihen und die Vergleichbarkeit mit anderen Messungen zu berücksichtigen. Bei der Funktionskontrolle von Anlagen, die schon ein paar Jahre in Betrieb sind, ist immer die Durchlässigkeit der Filteroberfläche massgebend und sollte gemessen werden. Dies spricht für die Ringinfiltrrometer und Zylindermethode. Die Vergleichbarkeit der Durchlässigkeit verschiedener Substrate z.B. Boden vs. Kiessand ist hingegen weniger wichtig. Fazit: Das Ringinfiltrrometer ist die geeignetste Methode, denn damit kann die Oberfläche gemessen werden

6 Hydraulik II: Hydraulische Leistung von Anlagen

6.1 Übersicht

Als Kenngrösse zur Beschreibung der hydraulischen Leistung eines Retentionsfilters wird der spezifische Durchfluss verwendet. Dieser ist definiert durch das Wasservolumen, welches pro Quadratmeter Filterfläche und pro Zeit durch einen Retentionsfilter fliesst. Die gebräuchliche Einheit, die in diesem Fachteil verwendet wird ist

- Liter pro Quadratmeter Filterfläche pro Minute ($l/m^2/min$)

Mit dieser Kenngrösse ist es möglich, die hydraulische Leistung von Filtern untereinander zu vergleichen sowie Retentionsfilter zu dimensionieren. Beispielsweise kann das RFB einer SABA mit geringem spezifischen Durchfluss dieselbe Wassermenge behandeln wie das RFB einer SABA mit hohem spezifischem Durchfluss, nur wird die Fläche des RFB mit geringerem spezifischem Durchfluss grösser ausfallen.

In diesem Kapitel werden die maximal erzielten spezifischen Durchflüsse verwendet. Dies sind Werte, welche ein RFB mehrfach während den meistens über ein halbes Jahr dauernden Messungen erzielt hat. Es ist an dieser Stelle wichtig zu erwähnen, dass sich der spezifische Durchfluss im Verlauf eines Jahres verändert. Am höchsten ist er im Sommer und Herbst, wenn der Filter abtrocknen kann. Am geringsten sind Werte im Winter und Frühjahr. Diese Verteilung ist insofern günstig, da intensive Niederschläge in den Sommer und Herbstmonaten auftreten.

Berechnet wird der spezifische Durchfluss, indem der Durchfluss, typischerweise gemessen im Ablauf von RFB, dividiert wird durch die Filterfläche. Liegen keine Messungen zum Durchfluss im Ablauf vor, kann die Abnahme des Wasserstands pro Zeit im RFB nach einem Regenereignis genutzt werden. Dies setzt die Messung des Wasserstands im RFB voraus.

Eine weitere Kenngrösse zur Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit einer SABA ist der hydraulische Wirkungsgrad. Dieser setzt die Wassermenge, die insgesamt einer SABA zugeflossen ist in Relation zur behandelten Wassermenge. Bei den untersuchten SABA liegt der hydraulische Wirkungsgrad bei über 90 % und somit vergleichbar.

6.2 Vergleich der spezifischen Durchflüsse der SABA-Typen

Die Ergebnisse der untersuchten SABA sind in Tab. 2 zusammengefasst und in den Abb. 19 bis Abb. 21 grafisch dargestellt. Werden in einem ersten Schritt die Mittelwerte sowie die maximalen und minimalen Werte aller untersuchten SABA betrachtet, können folgende Aussagen gemacht werden:

- Der mittlere spezifische Durchfluss der Sandfilter-SABA ist mit $8.7 l/min/m^2$ um das Vierfache höher als derjenige der Bodenfilter-SABA mit $2 l/min/m^2$.
- Der tiefste Wert bei den Sandfilter-SABA von $3.5 l/min/m^2$ ist achtfach höher als der tiefste Wert bei den Bodenfilter-SABA mit $0.4 l/min/m^2$.
- Mit $15.4 l/min/m^2$ liegt der höchste Wert der Sandfilter-SABA knapp viermal über dem höchsten Wert der Bodenfilter-SABA mit $4 l/min/m^2$.
- Die Spannweite der spezifischen Durchflüsse der beiden Filtertypen ist unterschiedlich: Diejenige der Bodenfilter-SABA ist grösser als diejenige der Sandfilter-SABA: Die Werte umfassen bei den Bodenfilter-SABA einen Bereich von 0.4 bis $4 l/min/m^2$

(Faktor 10) und bei den Sandfilter-SABA einen Bereich von 3.5 - 15.4 l/min/m² (Faktor 4.4).

Um die Details dieser Sachverhalte näher zu beleuchten, werden in einem zweiten Schritt die einzelnen SABA genauer betrachtet, beginnend mit den Bodenfilter-SABA.

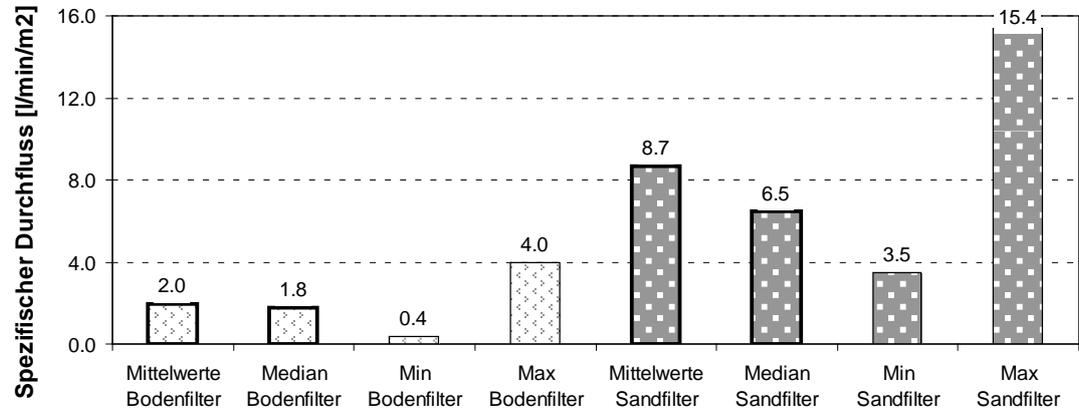


Abb. 19 Vergleich des spezifischen Durchflusses von Boden- und Sandfilter-SABA (bepflanzt).

Tab. 2 Maximale spezifische Durchflüsse der SABA.

Typ	SABA	Qmax spez. [l/min/m ²]
Bodenfilter SABA	Neuwiesen Phase 2	4.0
	Neuwiesen Phase 1	1.8
	Forch 6	0.4
	SABA Reusstal	3.0
	SABA A0	0.6
	Mittel Bodenfilter	2.0
	Median Bodenfilter	1.8
	Min	0.4
Max	4.0	
Sandfilter SABA	Ristet 2015	10.7
	Ristet 2009	na.
	Forch 1	15.4
	Forch 2	14.8
	Forch 3	5.2
	Forch 4	6.5
	Chlosterschür Phase 2	4.5
	Chlosterschür Phase 1	3.5
	Mittel Sandfilter	8.7
	Median Sandfilter	6.5
	Min	3.5
Max	15.4	

SABA Neuwiesen

Bei der SABA Neuwiesen hatte der spezifische Durchfluss in Phase 2 (März 2013 bis November 2015) gegenüber Phase 1 (Jahr 2012, nach dem Einstau) zugenommen (Abb. 20). In Phase 2 wurden Maximalwerte 3.5 - 4 l/min/m² gemessen, während in Phase 1 nur 1.4 - 1.8 l/min/m² typisch waren. Die Ursache für die höheren Werte in Phase 2 liegt

darin, dass der Filter in den Monaten nach dem temporären Einstau vor Phase 1 seine optimale hydraulische Leistung noch nicht erreicht hatte. Dies kam erst in Phase 2 zum Tragen. Unterschiede bei den Ablaufkonzentrationen zwischen Phase 1 und Phase 2 konnten keine festgestellt werden.

Interessant ist jedoch die Tatsache, dass der Schadstoffrückhalt vor Phase 1 (Jahr 2011) bedingt durch präferenziellen Fluss schlechter war und erst durch den temporären Einstau verbessert wurde [Bericht SABA Chlosterschür und Neuwiesen, 67].

SABA Reusstal

Die SABA A (Reusstal) weist mit 3 l/min/m^2 neben der SABA Neuwiesen in Phase 2 den höchsten spezifischen Durchfluss auf. Anders als bei der SABA Neuwiesen sind bei der SABA Reusstal jedoch die Ablaufkonzentrationen erhöht [Bericht SABA Reusstal, 74]. Dafür werden zwei Ursachen in Betracht gezogen. Die eine ist die Zufuhr von Fremdwasser, welche zur lokalen Vernässung führt, die andere sind ungünstige bautechnische Details, wie eine senkrechte Betonwand oder ein Schacht im RFB, welche präferenziellen Fluss begünstigen¹⁴.

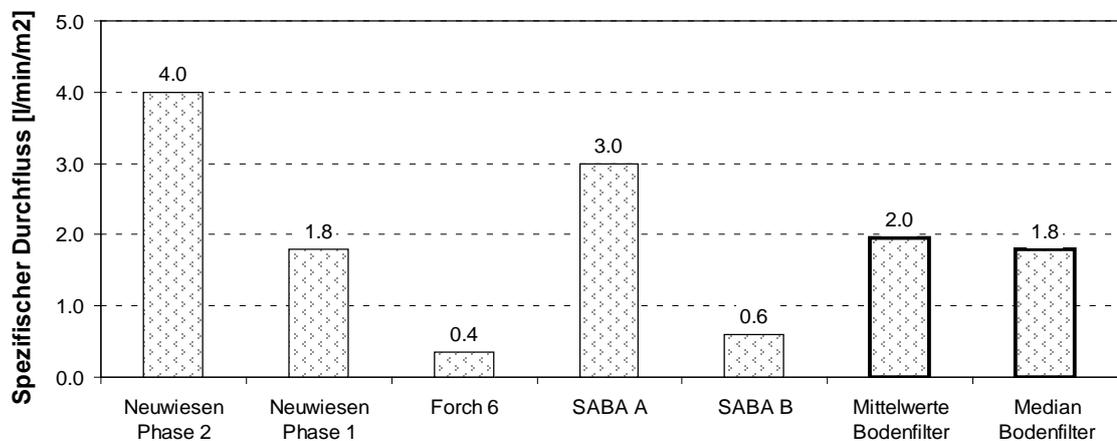


Abb. 20 Vergleich des spezifischen Durchflusses von Bodenfilter SABA (bepflanzt), SABA A = SABA Reusstal, SABA B = SABA 0 Oensingen

Auch die Sandfilter-SABA zeigen beträchtliche Unterschiede beim spezifischen Durchfluss. Folgende Betrachtungen der einzelnen SABA bringen mehr Klarheit. Die Betrachtung der Anlagen folgt den ansteigenden Werten.

SABA Chlosterschür

Der tiefste spezifische Durchfluss der untersuchten RFB wurde bei SABA Chlosterschür in Phase 1 gemessen (Abb. 21). In Phase 2 stieg dieser auf 4.5 l/min/m^2 . Eine Ursache für diesen geringen Wert war die zeitweise Beschickung des RFB mit Fremdwasser. Zudem befindet im Einzugsgebiet der SABA ein Betrieb, durch dessen Transporte regelmäßig ton- und kalkhaltige Feinstoffe in das Strassenabwasser gelangten. Diese Ablagerungen führten soweit, dass sich auf der Filteroberfläche eine Kruste bildete, die auf einer kleinen Teilfläche (ca. 200 m^2) mechanisch entfernt wurde. Nach der konsequenten Abtrennung des Fremdwassers verbesserte sich die Sickerleistung wieder, d.h. in den Trockenphasen konnte sich der Filter regenerieren. Dies zeigt, wie empfindlich RFB auf Fremdwasser und chemisch betrachtet hartes Wasser reagieren. Es ist anzunehmen, dass der spezifische Durchfluss des RFB der SABA Chlosterschür ohne diese beiden Ursachen höher ausfallen würde.

¹⁴ Eine nachträgliche Untersuchung der RFB zeigte, dass hier der Unterboden zu locker gelagert ist, so dass auf der ganzen Filterfläche präferenzieller Fluss auftritt und das Wasser bereits beim Zulauf zu schnell und nur ungenügend gereinigt in die Drainage gelangt. [Bericht SABA Reusstal, 73]

SABA Forch 3 und 4

Die spezifischen Durchflüsse der SABA Forch 3 und Forch 4 sind um 15 - 45 % höher als diejenigen der SABA Chlosterschür, aber insbesondere geringer als diejenigen von Forch 1 und Forch 2. Dies ist auf den ersten Blick erstaunlich, da die Dimensionierung und der Filteraufbau bei den SABA Forch 1 bis Forch 4 vergleichbar schienen.

Im Detail stellte sich heraus, dass die SABA 1 hydraulisch höher belastet ist als die anderen 3 SABA. Ein weiterer Unterschied betrifft das RFB der SABA 4, in welchem ein größerer Sand eingebaut ist (HASTAG AG, Rafzerfeld) als in den RFB der SABA 1 bis 3 (Tägerhard).

Daher ist zu vermuten, dass die SABA Forch 3 und 4 während der Messungen hydraulisch nicht an die Leistungsgrenze gebracht wurden. Entsprechend wurden die höchsten Durchflüsse im Sommer 2016 mit nur teilweise eingestautem RFB erzielt. Ein höherer Einstau wurde nicht gemessen.

SABA Ristet, Forch 1 und Forch 2

Die höchsten spezifischen Durchflüsse zeigen die SABA Forch 1, Forch 2 und Ristet, nämlich zwischen 10.7 und 15.4 l/min/m² auf. Diese ähnlichen Werte sind erstaunlich, da sowohl die Dimensionierung [33] dieser SABA als auch die hydraulische und stoffliche Belastung unterschiedlich sind. In Zahlen: Die spezifische Schadstoffbelastung der SABA Forch 1 ist mehr als doppelt so hoch wie diejenige der SABA Forch 2. Zudem weist die SABA Forch 1 keine Absetzbecken auf.

Die Ursache für die höchsten Leistungen dieser drei SABA ist in Anbetracht der vergleichbaren Werte in der Tatsache begründet, dass die RFB der SABA Ristet, Forch 1 und Forch 2 während der Messungen hydraulisch an die Leistungsgrenze gelangten (Entlastungen, mit Ausnahme der SABA Ristet).

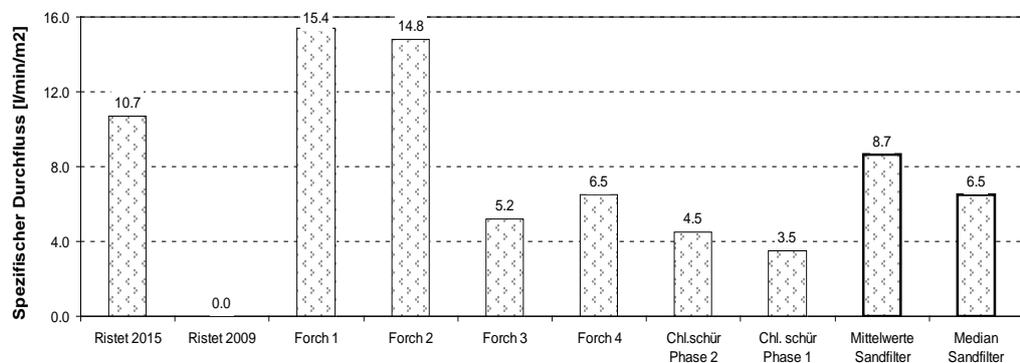


Abb. 21 Vergleich des spezifischen Durchflusses von Sandfilter SABA (bepflanzt).

6.3 Kolmation

Bei keiner der beobachteten SABA welche zwischen 3 und 10 Jahren in Betrieb waren, konnte bisher eine Kolmation, sichtbar am abnehmenden spezifischen Durchfluss, festgestellt werden. Trotzdem kann aufgrund vorliegender Ergebnisse keine vollständige Entwarnung gegeben werden. Es wird deshalb empfohlen, bei den entsprechenden SABA künftig in spätestens fünf Jahren den spezifischen Durchfluss nochmals zu bestimmen, um die Aussagen bezüglich der Kolmation schärfen zu können.

6.4 Erkenntnisse

Die Erkenntnisse aus den untersuchten Anlagen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der spezifische hydraulische Durchfluss von RFB mit bepflanzttem Sandfilter ist im Vergleich zu Bodenfilter SABA im Mittel um das Vierfache höher. Interessant ist dabei die Tatsache, dass die Ablaufkonzentrationen der Sandfilter RFB im Vergleich zu Bodenfilter RFB nicht erhöht sind (Kapitel 1).
- Zur Dimensionierung von Sandfilter SABA sind spezifische hydraulische Durchflüsse der RFB von 3 bis 6 l/min/m² sinnvoll. Diese Empfehlung ist konservativ und berücksichtigt die nicht restlos geklärten Fragen bei den SABA Forch 3 und Forch 4.

Eine jetzt noch nicht geklärte Frage betrifft die langfristige Kolmationsanfälligkeit beider SABA-Typen. Bisher sind weder bei den SABA Neuwiesen und Chlosterschür (seit acht Jahren in Betrieb), noch bei der SABA Ristet (seit elf Jahren in Betrieb) Anzeichen dazu festzustellen. Mit Kontrollmessungen mindestens alle fünf Jahre würde eine genauere Grundlage zur Abschätzung der Kolmationsanfälligkeit bestehen.

7 Reinigungsleistung

7.1 Übersicht

Die Messungen der untersuchten SABA basieren prinzipiell auf den Merkblättern des ASTRA zu Funktions- und Leistungsprüfungen [11], [12]. Bei den untersuchten Anlagen wurden deshalb grundsätzlich die Ablaufkonzentrationen bestimmt. Bei einigen Anlagen wurden zudem auch die Zulaufkonzentrationen gemessen. Alle Zu- und Ablaufkonzentrationen basieren entsprechend auf Frachtmittelwerten mit durchflussproportionalen Probenahmen.

Zur Beurteilung der Schadstoffentfernung werden die Ablaufkonzentrationen sowie der Wirkungsgrad der SABA verwendet. Dazu werden die Messungen der Schadstoffkonzentrationen im Zulauf zur SABA und im Ablauf der RFB genutzt. Der so berechnete Wirkungsgrad ist der Wirkungsgrad der Behandlung, also ohne Berücksichtigung der Entlastungen. Da bei allen untersuchten SABA der hydraulische Wirkungsgrad bei über 90% liegt, ist der Vergleich dieser Wirkungsgrade möglich.

Ablaufkonzentrationen

Zur Beurteilung der SABA werden in erster Linie die erzielten Ablaufkonzentrationen verwendet, da diese bei allen Anlagen vorliegen. Die Ablaufkonzentrationen beziehen sich auf eine technische Betrachtungsweise mit Fokus auf den Anlagenvergleich [13]. Sie sind nicht als Einleitbedingungen oder ökologische Vorgaben zu verstehen, bei welchen zahlreiche Faktoren des Vorfluters wie beispielsweise das Einleitverhältnis (Vulnerabilität) eine Rolle spielen.

Wirkungsgrade

Bei denjenigen Anlagen mit der Messung der Zulaufkonzentrationen wurden zusätzlich die Wirkungsgrade berechnet. Der Wirkungsgrad ist eine technische Kenngrösse, welche die erzielte Ablaufkonzentration ins Verhältnis zur Zulaufkonzentration setzt. Bei SABA ist der angegebene Wirkungsgrad immer ein mittlerer Wirkungsgrad, der sich auf die Dauer der einzelnen Probenahme bezieht. Die zeitliche Verschiebung zwischen Zu- und Ablauf infolge der Aufenthaltszeit im Absatz- oder Retentionsfilterbecken bedingt, dass sich die Probenahmen im Zu- und Ablauf über mehrere Regenereignisse erstrecken. Bei der Interpretation von Wirkungsgraden ist deshalb zu beachten, dass erstens bei gleichem Wirkungsgrad und unterschiedlich hohen Zulaufkonzentrationen unterschiedliche Ablaufkonzentrationen resultieren. Zweitens resultieren von SABA mit tiefen Zulaufkonzentrationen auch bei tiefen Ablaufkonzentrationen automatisch tiefere Wirkungsgrade. Zur Beurteilung der Wirkungsgrade sind deshalb unbedingt die Zulaufkonzentrationen zu berücksichtigen.

7.2 Schadstoffentfernung: Konzentrationen

7.2.1 Zulaufkonzentrationen

Die erzielten Zu- und Ablaufkonzentrationen sind numerisch in Tab. 3 und grafisch in den Abb. 22 bis Abb. 25 dargestellt. In Tab. 3 sind zudem die typischen Zulaufkonzentrationen in der untersten Zeile aufgeführt [13].

Die gemittelten Zulaufkonzentrationen von Kupfer und Zink der untersuchten SABA beider Filtertypen liegen innerhalb des Bereichs typischer Werte. GUS ist etwas erhöht, was nicht aussergewöhnlich ist.

Die gemittelten Zulaufkonzentrationen beider SABA-Typen sind vergleichbar (Abb. 22). Die Datenlage bei den Zulaufkonzentrationen der Bodenfilter-SABA ist mit zwei SABA gerade genügend. Da der Bereich der Zulaufkonzentrationen hohe und tiefe Werte umfasst und mit demjenigen der Sandfilter-SABA vergleichbar ist, ist die Repräsentativität gegeben (Abb. 23). Auch bei den Sandfilter-SABA zeigen die frachtmittelten Zulauf-

konzentrationen beträchtliche Unterschiede. Bei GUS liegt der Bereich der frachtgemittelten Zulaufkonzentrationen zwischen 94 mg/l und 646 mg/l, bei Kupfer zwischen 50 µg/l und 203 µg/l und bei Zink zwischen 164 und 742 µg/l.

Solche Unterschiede sind typisch. Beispielsweise sind die Schadstoffkonzentrationen von Autobahnabwasser geringer als diejenigen von Kantonsstrassen, da der Pannenstreifen für eine Verdünnung des Strassenabwassers sorgt. Weitere Faktoren, welche die Schadstoffkonzentrationen beeinflussen sind beispielsweise die Verkehrsbelastung, Lärmschutzwände, Steigungen und Kreisel, oder auch die Wartungsintervalle der Schlamm-sammler sowie das Auftreten von Starkregen.

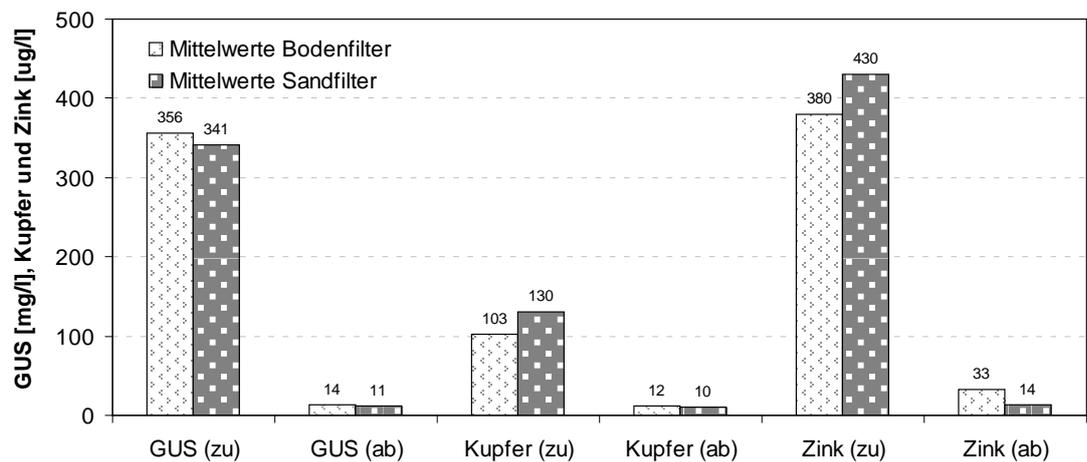


Abb. 22 Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen der Boden- und Sandfilter-SABA.

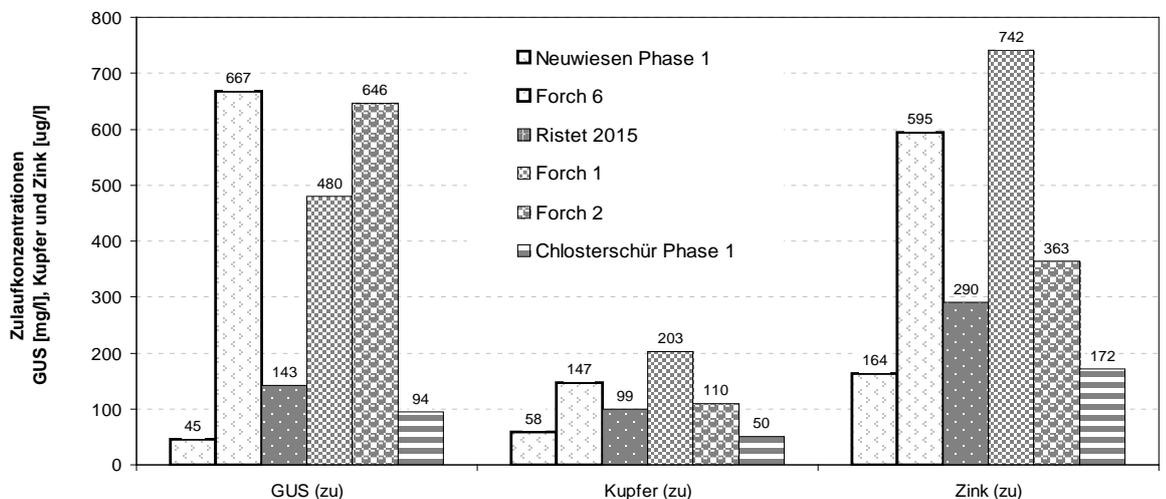


Abb. 23 Zulaufkonzentrationen der SABA. Die beiden Bodenfilter SABA sind fett gerahmt.

7.2.2 Ablaufkonzentrationen

Trotz der unterschiedlichen Zulaufkonzentrationen zeigen die gemittelten Ablaufkonzentrationen beider SABA-Typen für GUS und Kupfer praktisch dieselben Mittelwerte (Abb. 22). Der um 3 mg/l tiefere Wert der Sandfilter SABA bei GUS ist infolge der Bestimmungsgrenze von GUS bei 10 mg/l nicht unbedingt aussagekräftig. Bei Kupfer liegt die Bestimmungsgrenze bei 5 µg/l, weshalb die Ablaufkonzentrationen der Sandfilter-SABA als tiefer beurteilt werden können als diejenigen der Bodenfilter-SABA. Bei Zink ist die Sachlage so, dass der Mittelwert der Bodenfilter-SABA mit 33 µg/l höher ist als derjenige

der Sandfilter-SABA mit 14 µg/l. Die Ursache für diesen Unterschied wird im nächsten Kapitel diskutiert.

Tab. 3 Zu- und Ablaufkonzentrationen sowie Wirkungsgrade. Die Daten zu Konzentrationen der SABA B liegen noch nicht in gesicherter Form vor.

Typ	SABA	GUS [mg/l]		[%]	Kupfer [µg/l]		[%]	Zink [µg/l]		[%]	Q _{max}
		Zulauf	Ablauf	W'Grad	Zulauf	Ablauf	W'Grad	Zulauf	Ablauf	W'Grad	
Bepflanzte Bodenfilter	Neuwiesen Phase 2		10			8.7			11.7		4.0
	Neuwiesen Phase 1	45	10	78	58	9	84	164	15	91	1.8
	Forch 6	667	8	98.8	147	6	95.8	595	24	95.9	0.4
	SABA Reuss		26			26			81		3.0
	SABA A0										0.6
	Mittelwert	356	13.5	88.4	102.5	12.4	89.9	380	33	93.5	2.0
	Median	356	10	88.4	102.5	8.85	89.9	380	19.5	93.5	1.8
	Min	45	8	78	58	6	84	164	11.7	91	0.4
	Max	667	26	98.8	147	26	95.8	595	81	95.9	4.0
Bepflanzte Sandfilter	Ristet 2015	143	10	93.0	99	8	92.4	290	15	94.8	10.7
	Ristet 2009				188	3	98	583	10	98	
	Forch 1	480	14	97	203	15	92	742	30	96	15.4
	Forch 2	646	12	98	110	9	92	363	14	96	14.8
	Forch 3		10			15			10		5.2
	Forch 4		10			12			10		6.5
	Chlosterschür Phase 2		10			10.2			10		4.5
	Chlosterschür Phase 1	94	13	86	50	9.5	81	172	13	92	3.5
	Mittelwert	341	11.3	93.5	129.9	10.3	91.1	430	14.0	95.4	8.7
	Median	311	10	95	110	10	92	363	12	96	6.5
	Min	94	10	86	50	3	81	172	10	92	3.5
	Max	646	14	98	203	15	98	742	30	98	15.4
Typische Bereiche	100-270			60-180			300-900				

Betrachtungen Bodenfilter-SABA

Anhand der unterschiedlichen Ablaufkonzentrationen bei Zink wird auf die Thematik der Stabilität der Schadstoffentfernung eingegangen (Abb. 24). Für den erhöhten Wert der Bodenfilter-SABA bei Zink sind die Ablaufkonzentrationen der SABA A massgebend, welche mit einem Wert von 81 µg/l den Mittelwert erhöhen. Ohne den Wert der SABA A läge der Mittelwert von Zink bei 17 µg/l und wäre damit vergleichbar mit demjenigen der Sandfilter-SABA. Die Ursache, auch für den präferenziellen Fluss, wurden bereits im Kapitel 6.2 diskutiert.

Ein weiteres Beispiel für die instabileren Ablaufkonzentrationen der Bodenfilter ist die SABA Neuwiesen. Wie bereits beim spezifischen hydraulischen Durchfluss besprochen, zeigt die SABA Neuwiesen vor Phase 1 infolge präferenziellen Flusses erhöhte Ablaufwerte. Nach den erfolgreichen Massnahmen zur Problembehebung war zwischen den Messungen der Jahre 2011 bis 2012 und 2013 bis 2015 praktisch kein Unterschied mehr

bei den frachtgemittelten Ablaufkonzentrationen der drei Schadstoffe erkennbar [Bericht SABA Chlosterschür und Neuwiesen, 67].

Diese Beispiele zeigen, dass die untersuchten Bodenfilter anfälliger sind auf unterschiedliche Einflüsse, was sich in einem erhöhten präferenziellen Fluss und damit in erhöhten und instabilen Ablaufkonzentrationen äussert.

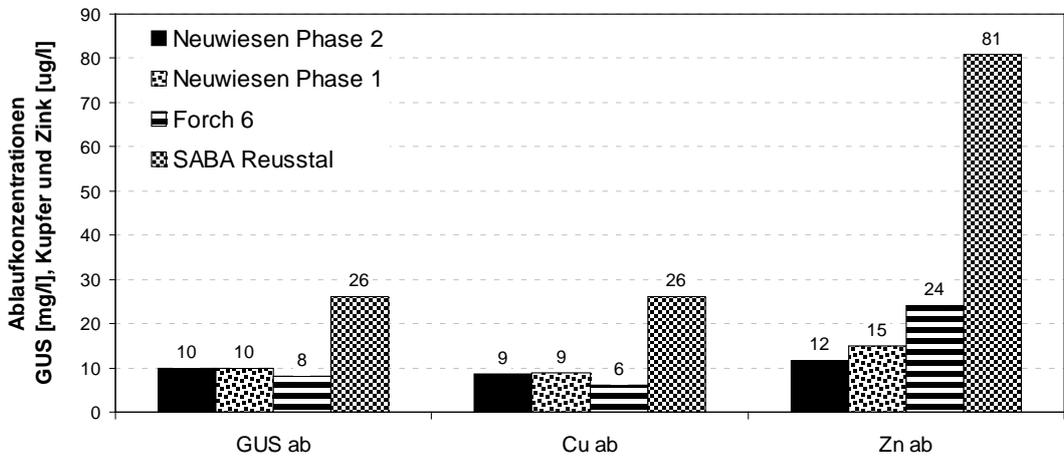


Abb. 24 Frachtgemittelte Ablaufkonzentrationen der Bodenfilter SABA.

Betrachtungen Sandfilter SABA

Bei den Sandfilter-SABA liegen die frachtgemittelten GUS-Konzentrationen im Ablauf in einem engen Bereich zwischen 10 mg/l und 14 mg/l (Abb. 25). Gemäss dem "Stand der Technik" [13] entspricht dies den beiden höchsten Leistungsklassen 4 und 5 [13].

Bei Kupfer liegt die Spannweite der Ablaufkonzentrationen zwischen 3 und 15 µg/l, was den Leistungsklassen 5 bis 3 entspricht. Der höchste Wert von 15 µg/l stammt von der SABA Forch 1. Entsprechend liegt der höchste Ablaufwert von Zink von 30 µg/l auch bei der SABA Forch 1.

Mit Ausnahme der SABA Forch 1 liegt der Bereich der Zink-Ablaufkonzentrationen zwischen 10 µg/l und 15 µg/l, was analog zu GUS der Leistungsklasse 5 oder 4 gemäss dem "Stand der Technik" entspricht.

Der Grund für die erhöhten Kupfer- und Zinkkonzentrationen im Ablauf der SABA Forch 1 liegt in der sehr hohen hydraulischen Belastung der SABA Forch 1. Wie Nachforschungen aufgrund der Messungen ergaben, ist die effektiv angeschlossene Strassenfläche rund dreimal so gross wie projektiert [Bericht SABA Forchstrasse, 62 und 63]. Bei der SABA Forch 1 erreichen die Zulaufkonzentrationen zudem die höchsten Werte. Insofern zeigen die Ergebnisse der SABA Forch 1 die Limitierung der hydraulischen und stofflichen Belastung von bepflanzten Sandfiltern.

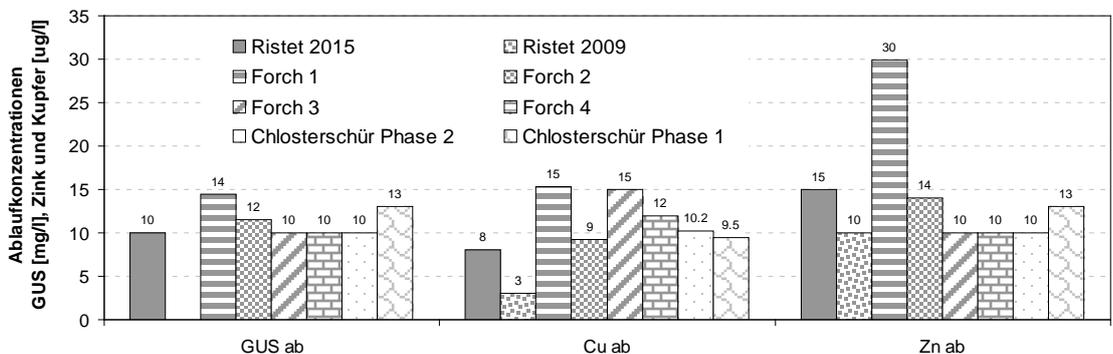


Abb. 25 Frachtgemittelte Ablaufkonzentrationen der Sandfilter-SABA.

Tab. 4 Klassierung der Schadstoffentfernung gemäss dem Stand der Technik [13].

Leistungsklasse	Ablaufkonzentration			Wirkungsgrad		
	GUS	Kupfer	Zink	GUS	Kupfer	Zink
	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[%]	[%]	[%]
Klasse 5	<10	<5	<10	>90	>90	>90
Klasse 4	20	10	20	80	80	80
Klasse 3	30	15	30	70	70	70
Klasse 2	40	20	40	60	60	60
Klasse 1	>40	>20	>40	<60	<60	<60

7.3 Schadstoffentfernung: Wirkungsgrade

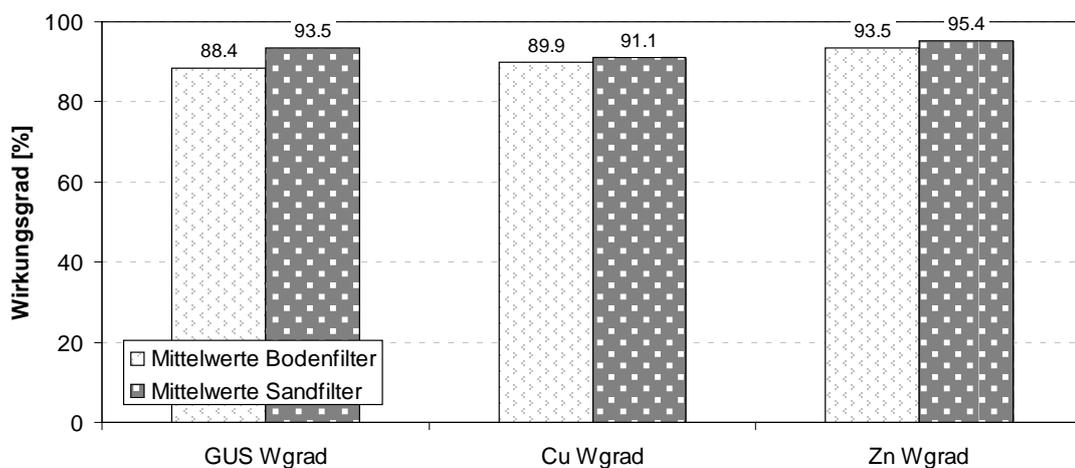
Die Mittelwerte der Wirkungsgrade der Boden- und Sandfilter SABA für GUS, Kupfer und Zink sind in Abb. 26 dargestellt. Auffallend sind die etwas tieferen Werte der Bodenfilter SABA. Hier zeigt sich die Auswirkung von geringen Zulaufkonzentrationen auf den Wirkungsgrad bei tiefen Ablaufkonzentrationen. Um diesem Sachverhalt näher zu beschreiben, sind in die Wirkungsgrade der einzelnen SABA in Abb. 27 zusammengestellt.

Zu sehen sind die tiefen Wirkungsgrade der SABA Neuwiesen in Phase 1 für alle drei Schadstoffe, welche die Folge der tiefen Zulaufkonzentrationen sind. Entsprechend vorsichtig sind die um einige Prozente tieferen Mittelwerte der Bodenfilter-SABA bei den Wirkungsgraden von GUS und von Kupfer zu betrachten. Dies auch deshalb, weil nur die Daten von zwei SABA vorliegen.

Die Auswirkung von tiefen Zulaufkonzentrationen auf die Wirkungsgrade kann auch bei der SABA Chlosterschür in Phase 1 beobachtet werden, nämlich mit Wirkungsgraden unter 90% bei GUS und Kupfer. Anders als bei den Bodenfilter-SABA werden diese tieferen Werte der SABA Chlosterschür in Phase 1 durch die zahlreicheren Daten besser ausgemittelt.

Die Wirkungsgrade der Bodenfilter-SABA liegen, bedingt durch den Einfluss der Daten der SABA Neuwiesen, für GUS mit 88.4% und für Kupfer mit 89.9% knapp unter 90%. Bei Zink werden 93.5% erzielt. Gemäss dem Stand der Technik entspricht dies den Leistungsklassen 4 und 5.

Die Mittelwerte der Wirkungsgrade der Sandfilter-SABA liegen für alle drei Schadstoffe über 90%, was gemäss dem "Stand der Technik" der Leistungsklasse 5 entspricht.

**Abb. 26** Mittelwerte der Wirkungsgrade der Boden- und Sandfilter SABA.

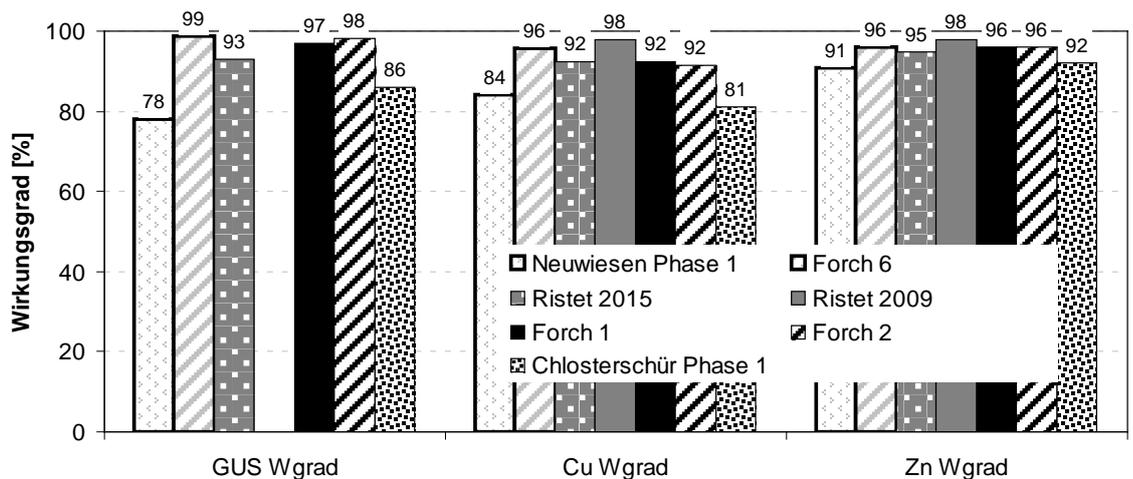


Abb. 27 Wirkungsgrade der einzelnen SABA. Die beiden Bodenfilter-SABA sind fett gerahmt.

7.4 Erkenntnisse

Die Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Ablaufkonzentrationen von GUS und Kupfer der Boden- und Sandfilter-SABA sind vergleichbar. Die Ablaufkonzentrationen von Zink sind bei Sandfilter SABA stabiler und um mindestens eine Leistungsklasse besser als bei den Bodenfilter-SABA.
- Die Ablaufkonzentrationen beider SABA-Typen entsprechen den Literaturwerten gemäss dem Stand der Technik [13]
- Die Sandfilter SABA zeigen eine mindestens gleich hohe und zudem stabilere Schadstoffentfernung als Bodenfilter-SABA, und dies trotz höherer hydraulischer Leistung.
- Somit sind Sandfilter-SABA künftig vorzuziehen, da sie platzsparender sind.
- Die Ablaufkonzentrationen der Boden- und Sandfilter SABA sind praktisch unabhängig von der Höhe der Zulaufkonzentrationen. Dies bedeutet, dass für künftige Funktionskontrollen solcher SABA-Typen nur die Ablaufkonzentrationen gemessen werden müssen, was im entsprechenden ASTRA-Merkblatt zu Funktionsprüfungen bereits so vorgesehen ist [11].
- Bei der Beurteilung von SABA mittels Wirkungsgraden ist immer auch eine Interpretation der Zulaufkonzentration nötig.

8 Betrieb, Unterhalt und Kosten

Boden- und Sandfilter sind grundsätzlich unterhaltsfreundliche Systeme. Voraussetzung für die einwandfreie Funktion ist allerdings, dass die Filterbecken nach jedem Einstau vollständig entleeren, so dass die Filter mit Luftsauerstoff versorgt werden. Langanhaltender Teileinstau oder Überstau ist zu verhindern, da hierdurch Nitrifikationshemmung und Mangan- und Eisenfreisetzung provoziert wird.

Müssen Filter mit permanentem Fremdwasserzufluss betrieben werden, ist zur Kolmationsvermeidung eine Fremdwasserweiche, oder eine alternierende Beschickung zweier Filterbecken zwingend notwendig. Die Beseitigung des Fremdwasserzuflusses an der Quelle sollte allerdings Priorität besitzen (vgl. auch [42]).

8.1 Anlagen und Methoden

Die Aussagen in diesem Kapitel basieren einerseits auf Auswertungen der Angaben im SABA Kataster [68, MISTRA SABA <https://saba.ilu.ch/saba/>]. Zudem lieferten die Unterhaltsverantwortlichen der Anlagen weitere Informationen. Eigene Erfahrungsberichte, Journale, Erfahrungen aus Unterhaltskursen wurden ausgewertet.

Im Anhang II sind die ausgewerteten Daten in Tabellen dokumentiert. Die Kenndaten von 49 SABA an National- und Kantonsstrassen wurden ausgewertet:

- 31 SABA mit bepflanzten Bodenfiltern und
- 18 SABA mit bepflanzten Sandfiltern (inkl. 4 Anlagen, die im Februar 2017 gebaut, aber noch nicht in Betrieb waren)

8.2 Grösse der Filterflächen

Die Auswertung zeigt eine grosse Streuung der spezifischen Filterflächen. Diese variieren von 82 bis 921 m² Filterfläche pro Hektare entwässerte Strassenfläche, also um mehr als einen Faktor 10.

Tab. 5 Spezifische Filterflächen in m² pro Hektare entwässerte Strassenfläche

	Minimum	Maximum	Mittelwert
Bodenfilter (31 Anlagen)	126 m ² /ha	921 m ² /ha	ca. 300 m ² /ha
Sandfilter (16 Anlagen)	82 m ² /ha	389 m ² /ha	ca. 200 m ² /ha

Die Unsicherheiten zur Dimensionierung der erforderlichen Filterflächen sind gross, vor allem bei Bodenfiltern. Bis etwa 2010 war die Überlegung der Projektanten vermutlich häufig: *lieber gross genug, dann funktioniert das Filterbecken sicher*. In den letzten Jahren wurde der Druck zur Realisierung von kompakten, platzsparenden Anlagen grösser. Aus heutiger Sicht sind viele, vor allem ältere Filterbecken zu gross und hydraulisch unterbelastet. Schon die Beobachtung der Vegetation bei Filterbecken, die seit einigen Jahren in Betrieb sind, zeigt, dass zulauffernere Bereiche häufig trockene Verhältnisse aufweisen.

Für die Dimensionierung von Sandfiltern stehen heute gute Grundlagen zur Verfügung (vgl. auch Kap. 1). Als Faustgrösse für die Behandlung von Strassenabwasser wird im Handbuch Retentionsbodenfilter [42] der Wert von 100 m² Filterfläche pro Hektare Strassenfläche vorgeschlagen, sofern die Jahresniederschlagsmenge weniger als 1000 mm beträgt. Andernfalls sind die Flächen entsprechend zu vergrössern. Unsere Auswertun-

gen bestätigen, dass SABA mit bepflanzten Sandfiltern mit rund 100 m² Filterfläche pro Hektare entwässerte Strassenfläche funktionieren, sogar bei Jahresniederschlagsmengen von leicht über 1 Meter.

Tab. 6 Bepflanzte Sandfilter mit spezifischen Filterflächen unter 100 m²/Hektare

SABA	spezifische Filterfläche	Bemerkung
Wüerital, Birmensdorf	98 m ² /ha Strassenfläche	in Betrieb seit 2009, hat Fremdwasserweiche und Vorbehandlung mit Absetzbecken
Vogelbach, Zumikon	82 m ² /ha Strassenfläche	in Betrieb seit 2013, keine Vorbehandlung

Für Bodenfilter können keine analogen Faustgrössen angegeben werden. Bei diesem Filtertyp muss die Durchlässigkeit der effektiv einzubauenden Bodenschichten berücksichtigt werden. Zudem kann bei Bodenfiltern die Art der Vorbehandlung einen Einfluss haben, da das Sediment aus dem Strassenabwasser die Bodenart verändert.

8.3 Betriebserfahrungen

Fremdwasser

Fremdwasser kann zu Störungen im Betrieb der SABA führen. Sofern das Fremdwasser nicht an der Quelle abgetrennt werden kann, haben sich folgende Systeme bewährt:

- Bypass mit Hahn/Schieber
- Bypass mit Stöpsel/Feder (Reinwasserweiche System M. Krüttli)
- gesteuerte Weiche (bei grösseren Anlagen mit Stromanschluss)

Der Einsatz von Schwimmern zur Schliessung des Bypasses hat sich nicht bewährt (vgl. SABA Thur-Süd, Andelfingen).

Ersatz von Filterschichten

Bei den drei SABA Reppisch, Thur-Süd und Sihlbrugg wurden zur Erhöhung der hydraulischen Leistung die Bodenschichten ausgebaut und durch Sand ersetzt. Dass Filterschichten aus Sand ersetzt werden mussten, ist uns nicht bekannt.

Drosselung des Ablaufes

Gemäss den Vorgaben im Handbuch Retentionsbodenfilter [42] und im DWA Merkblatt 178 [22] sollte der Ablauf aus Sandfiltern auf ca. 3 Liter pro Minute und m² Filterfläche gedrosselt werden, um eine optimale Reinigungswirkung zu erzielen. Vor allem bei Betriebsbeginn, wenn sich auf der Filteroberfläche noch kein Filterkuchen gebildet hat, ist die Sickerleistung ohne Drosselung wesentlich höher.

Die Auswertungen der Leistungsprüfungen und Funktionskontrollen [Bericht SABA Forchstrasse, 62 und 63] und [Bericht SABA Chlosterschür und Neuwiesen, 67] bei SABA mit bepflanzten Sandfiltern zeigen, dass die Reinigungsleistung auch ohne Drosselung und bei Sickerleistungen um die 10 Liter pro Minute und m² Filterfläche immer noch gut ist (vgl. auch Kap. 7 Reinigungsleistung). Spätestens nach einer ein bis zweijährigen Einlaufphase können somit auch bepflanzte Sandfilter ohne Ablaufdrosselung betrieben werden. Eine Ausnahme bilden natürlich SABA, bei denen zur Reduktion der Einleitmenge in ein kleines Oberflächengewässer eine Ablaufdrosselung erforderlich ist.

Im Gegensatz zu den Sandfiltern werden alle untersuchten Bodenfilter ohne Ablaufdrosselung betrieben.

Optimierungen beim Unterhalt

Bei den meisten Bodenfiltern wird die Vegetation regelmässig gemäht und entsorgt. Diese Massnahme bedeutet einen erheblichen Aufwand. Je nach Situation könnte der Auf-

wand reduziert werden durch eine andere Bepflanzung, z.B. mit Hochstauden anstelle von Gras.

Bei genügend grossen Anlagen könnte das Schnittgut vor dem Abtransport einige Monate am Rand des Filterbeckens gelagert werden, wodurch das Gewicht des zu entsorgenden Materials reduziert würde.

Ein wesentlicher Vorteil der Anlagen mit Sandfilter, ist, dass diese mit Schilf bepflanzt werden (vgl. Hinweise im Anhang III.5). Der Schilfbestand muss nicht gemäht werden, was den Aufwand für den Unterhalt reduziert.

Bei Anlagen mit einem Kiesfilter als Vorstufe kann geprüft werden, ob auf den Unterhalt des Kiesfilters teilweise oder ganz verzichtet werden könnte. Allenfalls gäbe es auch Möglichkeiten, den Kies kostensparend vor Ort zu waschen.

Vorgeschaltetes Absetzbecken

Bei Anlagen mit einem vorgeschalteten Absetzbecken werden bei einer Entleerung alle 2 Jahre im Durchschnitt ca. 2 m³ Schlamm pro ha Strasseneinzugsgebiet entnommen (Angaben der Gebietseinheiten). Je nach Einzugsgebiet variiert diese Menge.

Bei den SABA Thur-Süd (Andelfingen) und Vogelbach (Zumikon) wurde auf ein vorgeschaltetes Absetzbecken verzichtet. Bisher konnten dadurch keine Nachteile erkannt werden [Bericht Funktionskontrollen SABA 1 und 2 Forchstrasse, 62 und 63]. Bei der SABA Vogelbach (Zumikon) betrug die gemessene Zulaufkonzentration an GUS im Durchschnitt 480 mg/l. Trotz dieser hohen Feststoff-Frachten und der sehr hohen hydraulischen Belastung kolmatisierte der Sandfilter nicht. Die Sedimentschicht ist gut strukturiert und gut durchlässig. Die Filterfläche beträgt nur ca. 82 m² pro Hektare angeschlossener Strassenfläche. Die Sedimentablagerungen auf dem Filter betragen ca. 1.3 cm in 2 Jahren.

Bei kleinen Einzugsgebieten und bei Sandfiltern kann auf ein vorgeschaltetes Absetzbecken verzichtet werden [34]. Dass durch den Verzicht auf ein Absetzbecken die Lebensdauer des Filters reduziert wird, ist nicht erwiesen. Es gibt aber erst wenige Langzeiterfahrungen um diese Frage schlüssig zu beantworten. Im neuen Handbuch Retentionsbodenfilter [42] wird bei Sandfiltern als Vorstufe lediglich ein Grobsandabscheider vorgeschlagen.

8.4 Notwendige Massnahmen

Kontrollen

Bewährt haben sich regelmässige, z.B. monatliche Begehungen der SABA durch den Unterhaltsdienst. Bei diesen Rundgängen werden Zäune, Schilder, Schächte und Fremdwasser-Weichen kontrolliert und Filteroberflächen auf Vernässungen geprüft.

Die Funktionsfähigkeit der Anlagen sollte bei grossen Regenereignissen etwa zweimal pro Jahr visuell beurteilt und protokolliert werden. Bei Starkregen ist eine Kontrolle der Abflussleistung sinnvoll (z.B. einmal jährlich).

Die Schlammablagerungen in Absetzbecken oder vorgeschalteten Kiesfiltern sollten jährlich gemessen, respektive überprüft werden.

Unterhaltsarbeiten

Je nach dem Resultat der Kontrollen sind die technischen Unterhaltsarbeiten durchzuführen:

Spülen der Leitungen, Absaugen des Schlammes und Entfernen der Schwimmstoffe aus Absetz- und Oelrückhaltebecken, Unterhalt an Schiebern, Schächten, Pumpen und Armaturen, sowie allenfalls Abtrag von Schlammablagerungen auf vorgeschalteten Kiesfiltern. Für diese technischen Arbeiten bestehen keine Unterschiede zwischen Boden- und Sandfiltern. Grundsätzlich sollten die Absetzbecken jährlich gereinigt werden.

Bei der Grünpflege ist zu unterscheiden zwischen mit Gras bewachsenen Bodenfiltern und mit Schilf bepflanzten Sandfiltern. Schilf auf Filteroberflächen muss nicht gemäht werden, was eine wesentliche Erleichterung für den Unterhalt bedeutet. Mit Gras bewachsene Bodenfilter sind mindestens einmal jährlich zu mähen, um das Wachstum von Büschen und Bäumen zu verhindern. Wegen der Schadstoffbelastung ist das Schnittgut in einer Kehrichtverbrennungsanlage zu entsorgen. Bodenfilter mit einem Bewuchs aus Hochstauden nehmen eine Zwischenstellung ein. Je nach Verhältnissen sind die Hochstauden periodisch zu mähen, um einer Kolmation der Filteroberfläche vorzubeugen.

Bei allen Filtertypen sind Sträucher, Problempflanzen und invasive Neophyten auf den Filteroberflächen regelmässig auszureissen oder auszugraben. Die Bekämpfung von Problempflanzen und Neophyten ist bei Sandfiltern einfacher. Dieser Filtertyp kann periodisch eingestaut werden, um unerwünschte Pflanzen absterben zu lassen. Bodenfilter dürfen nicht eingestaut werden, da dies die Bodenstruktur schädigen und der Filter kolmatieren würde.

8.5 Betriebsdauer

Über die mögliche Betriebsdauer von Boden- und Sandfiltern liegen in der Schweiz noch zu wenige Erfahrungen vor. In der Literatur [2], [35] sind verschiedene Angaben zu finden, die jedoch vorwiegend auf Labor- und Lysimeterversuchen beruhen. Die Angaben schwanken in einem Bereich von 15 Jahren (für Zink) bis zu 50 Jahren (für Kupfer) bis zur Erschöpfung der Adsorptionskapazität. Die Unsicherheit besteht darin, dass mit dem Strassenabwasser laufend Feinpartikel und Huminstoffe zugeführt werden und damit auch die Adsorptionskapazität erhöht wird.

Die Betriebsdauer von Sandfiltern wird nach eigenen Überlegungen vermutlich durch das Vorschreiten der Invasionszone bzw. der Schadstofffront in die Tiefe bestimmt. Diese Bewegung wird sich zwar wegen zunehmendem Filterkuchen und damit besserer Partikelabscheidung auf der Sandoberfläche des Filters mit den Jahren etwas verlangsamen.

Eine vorsichtige Extrapolation ergibt bei einer Sandschicht von ca. 70 cm eine Lebensdauer von voraussichtlich mindestens 30 Jahren. Bei einem Fortschreiten der Invasionszone mit einer Geschwindigkeit von ca. 1.5 cm/a (Kap. 4.5.3 Veränderung der Invasionszone) wird die Front erst in ca. 30 Jahren im unteren Drittel der Sandschicht angelangt sein. Diese Annahme ist insofern konservativ, als in der Berechnung eine lineare Zunahme angenommen wird, was in der Praxis wegen der zunehmenden Filterwirkung der Sedimentauflage kaum zutreffen wird. Die Invasionszone wird sich eher verlangsamt in die Tiefe ausdehnen. Weiter ist mit dem untersten Drittel der Sandschicht noch eine Sicherheitszone angenommen, denn solange sich die Schadstofffront noch oberhalb befindet, ist kaum mit einem Filterdurchbruch zu rechnen. [Bericht SABA Wüerital, 79] und [Bericht SABA Chlosterschür, 67] Für gesicherte Aussagen zur Lebensdauer eines Sandfilters fehlen allerdings die Langzeitbeobachtungen.

Bei den Bodenfiltern vom Typ Oberboden/Kiessand wird die Betriebsdauer vermutlich durch innere Kolmation an der Grenze zum Kiessand begrenzt oder durch einen Filterdurchbruch im Kiessand. Für zuverlässige Aussagen liegen noch zu wenige Erfahrungen vor.

8.6 Funktionskontrollen

Die Angaben in der Literatur und unsere Erfahrungen zeigen, dass bei Retentionsfilterbecken mindestens alle fünf Jahre eine Funktionskontrolle durchgeführt werden sollte. Fehlfunktionen können vor allem bei Bodenfiltern oft während Jahren unerkannt bleiben, weil bei präferenziellem Fluss zwar für den Betrieb und Unterhalt kein Problem besteht, jedoch die Reinigungsleistung ungenügend ist. Für die Funktionsprüfung stehen Merkblätter zur Verfügung. [11], [12]

8.7 Kosten

8.7.1 Investitionskosten

Die Auswertung der Daten aus dem SABA Kataster (MISTRA SABA Stand am 7.2.2017 <https://saba.ilu.ch/saba>) [9] zeigt eine grosse Spannweite bei den Investitionskosten (Baukosten inkl. Landerwerb und inkl. Projektierung) von ca. CHF 100'000.- bis ca. CHF 600'000.- pro Hektare entwässerte Strassenfläche. Der Median der Investitionskosten beträgt bei den

- Bodenfiltern ca. CHF 230'000.- pro Hektare entwässerte Strassenfläche und bei den
- Sandfiltern (ohne kantonale Anlagen) ca. 180'000.- pro Hektare entwässerte Strassenfläche

Tendenziell sind die spezifischen Kosten pro Hektare Einzugsgebiet bei Anlagen mit kleinen Einzugsgebieten höher als bei Anlagen mit grösseren Einzugsgebieten.

8.7.2 Betriebskosten

Bewachsene Boden- und Sandfilter sind grundsätzlich unterhaltsfreundliche Systeme. Im Vergleich zu technischen Systemen ist der Aufwand für Betrieb und Unterhalt gering.

Die Auswertung der Daten aus dem SABA Kataster (MISTRA SABA Stand am 7.2.2017 <https://saba.ilu.ch/saba>) [9] ergibt folgende mittlere jährliche Betriebskosten (Details siehe Anhang II):

- SABA mit Bodenfilter ca. CHF 1'800.- pro Hektare entwässerte Strassenfläche und
- SABA mit Sandfilter ca. CHF 1'000.- pro Hektare entwässerte Strassenfläche

Die Betriebskosten wurden von den Gebietseinheiten erhoben. Die Angaben umfassen nicht immer die gleichen Aufwendungen. Zum grössten Teil wurden nur die Kalkulationskosten für die Angebote verwendet und nicht die realen Kosten. Damit sind vermutlich nicht alle Arbeiten erfasst und dokumentiert (Spülen der Leitungen, Schlamm absaugen aus Absetzbecken, etc.). Frühere Auswertungen von detailliert erfassten Angaben für einige SABA ergaben höhere Betriebskosten von ca. CHF 3'000.- pro Hektare entwässerte Strassenfläche für Bodenfilter und etwa CHF 2'000.- für Sandfilter.

Die Unterschiede zwischen Boden- und Sandfiltern sind plausibel. Die meisten untersuchten Bodenfilter sind mit Gras bewachsen, das regelmässig gemäht und in einer KVA entsorgt werden muss. Demgegenüber sind alle untersuchten Sandfilter mit Schilf bepflanzt und werden nicht gemäht. Zudem sind die spezifischen Filterflächen bei den ausgewerteten Bodenfiltern grösser als bei den Sandfiltern (Mittelwert Bodenfilter: ca. 300 m² Filterfläche pro Hektare entwässerte Strassenfläche; Mittelwert Sandfilter: ca. 200 m² Filterfläche pro Hektare entwässerte Strassenfläche).

9 Diskussion und Empfehlungen

9.1 Sandfilter sind zu bevorzugen

Die Untersuchungen zeigen, dass alle Sandfilter mit Schilfbewuchs eine hohe Reinigungsleistung aufweisen. Partikel und Schadstoffe wie Schwermetalle und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) werden zuverlässig zurückgehalten. Die Adsorptionskapazität des Sandes ist zwar begrenzt. Nachdem aber mit dem Strassenabwasser laufend mineralische Partikel nachgeliefert werden und die im Filter eingelagerte organische Substanz ebenfalls zusätzliche Adsorptionskapazität hat, scheint das System praktisch beliebig aufnahmefähig zu sein.

- Die Reinigungsleistung von Sandfiltern ist derjenigen von Bodenfiltern mindestens ebenbürtig, wenn nicht gar überlegen. (Kap. 1, Reinigungsleistung)
- Sandfilter haben generell eine geringe Neigung zu kolmatieren, wenn der Schilfbestand gut entwickelt und das RFB nicht durch Fremdwasser überlastet ist.
- Sandfilter brauchen auch infolge des höheren spezifischen Durchflusses weniger Platz als Bodenfilter.
- Zudem verursachen Sandfilter im Vergleich zu anderen Filtertypen einen geringeren Aufwand im Unterhalt. Sie sind sowohl im Bau als auch im Betrieb günstiger als Bodenfilter (vgl. Kap. 8 Betrieb, Unterhalt und Kosten).

9.2 Vorbehalte bei Bodenfiltern

Gegen die Verwendung von Boden als Filtersubstrat in SABA bestehen folgende Einwände:

Wichtigster Einwand sind die Probleme beim Bau des Filters. Während bei einem Sandfilter das Material u.a. durch eine Siebkurve relativ einfach definiert werden kann, ist dies bei einem Bodenfilteraufbau wesentlich komplizierter. In vielen Fällen steht kein geeigneter Boden zu Verfügung und besonders ist geeigneter Unterboden unter unseren Verhältnissen schwierig zu beschaffen. Bei der Materialwahl können daher mehr Fehler unterlaufen. Ebenso ist der Aufbau eines Bodenfilters mit mehreren Schichten für den Unternehmer anspruchsvoller. Durch falsches Einbringen des Bodens oder nachträgliches Verdichten können Schäden entstehen, welche die Leistung des Filters beeinträchtigen.

Mehrere Untersuchungen zeigten, dass eine ca. 30 cm mächtige Schicht Oberboden nicht ausreicht, um ausreichend Filter- und Sorptionskapazität zur Verfügung zu stellen. Bei Bodenfiltern ist daher in der Regel eine Schichtung von mehreren Substraten erforderlich, z.B. Ober-/Unterboden oder Oberboden/Kiessand. Dieser Aufbau aus mehreren Schichten ist problematisch, weil an den Schichtgrenzen in der Regel die Porenkontinuität gestört ist. Damit verbunden sind unterschiedliche Wassergehalte, was unerwünschte Phänomene wie Kolmation, Lateralfloss und präferenziellen Fluss bedingen kann. Bei vielen der untersuchten Bodenfilter war präferenzialer Fluss ein Problem. (siehe Kap. 1 Hydraulik I)

Fruchtbarer Boden ist ausserdem eine knappe und wertvolle Ressource, die bei Bauarbeiten anfällt und eigentlich für Rekultivierungen verwertet werden sollte. Der Einsatz als Filtersubstrat ist eigentlich ein Verbrauch. In der Praxis wird allerdings häufig Bodenmaterial aus dem Strassenbereich genommen, das ohnehin belastet ist und gemäss VBBo nicht mehr für Rekultivierungen eingesetzt werden darf.

9.3 Absetzbecken

Bei Sandfiltern könnte wegen der positiven Eigenschaften des Sediments für die Adsorption von Schadstoffen das Absetzbecken soweit verkleinert werden, dass nur noch die gröbere Sandfraktion zurückgehalten wird. Die schadstoffbelastete Feinfraktion soll hingegen auf dem Filter abgelagert werden. Die Erfahrungen mit SABA 1 Forchstrasse haben gezeigt, dass dies funktioniert. Die Feinpartikel bilden im Laufe der Betriebszeit eine Sedimentschicht als Sekundärfilter aus und erhöhen die Sorptionskapazität des Filters. Um die Vorteile dieses Prozesses nutzen zu können, sollte die Vorstufe nur für den Rückhalt der mineralischen, grobpartikulären Fraktion ausgelegt sein. Diese Grobfraktion kann wegen der geringen Schadstoffbelastung auch kostengünstiger entsorgt werden.

Ein vorgeschaltetes Absetzbecken ist bei einem Störfall vorteilhaft, da bei einem Störfall eine Verschmutzung des Filters verhindert werden kann. Bei der Planung sind Risikoüberlegungen miteinzubeziehen.

9.4 Verminderung des präferenziellen Flusses bei Bodenfiltern

Präferenzieller Fluss tritt in unterschiedlichem Ausmass bei allen Bodenfiltern auf und ist der wichtigste Einwand gegen die Verwendung von Boden als Filtersubstrat. Zur Vermeidung oder zumindest Reduktion von präferenziellem Fluss bieten sich folgende Massnahmen an:

Die Filteroberfläche soll horizontal und plan gestaltet sein. Schichtgrenzen sind parallel zur Oberfläche zu führen. Zu vermeiden ist der Unterbruch der Porenkontinuität an Schichtgrenzen. Bei Schichten mit unterschiedlichen Substraten ist daher auf passende Abstufung der Korngrössenverteilung zu achten. Bei Bodenfiltern sollten nur geeignete Bodenarten eingesetzt werden und es ist auf fachgerechte Verarbeitung zu achten, damit grosse Aggregate vermieden werden.

9.5 Kontrollmessungen

Zur Sicherstellung der langfristigen Leistungsfähigkeit wird, wie auch im Merkblatt des ASTRA [11] empfohlen, die Kolmation alle 5 Jahre mit Hilfe der Messung des spezifischen Durchflusses zu bestimmen.

Anhänge

I	Fotodokumentation.....	75
I.1	Übersicht der Infiltrationsmuster	75
II	Verzeichnis der Anlagen	81
II.1	SABA mit Bodenfiltern	81
II.2	SABA mit bepflanzten Sandfiltern.....	82
III	Hinweise zu Planung bis Inbetriebnahme	85
III.1	Planung	85
III.2	Konstruktion	87
III.3	Kurzschlussströmungen, präferenzielle Fließwege	88
III.4	Bau.....	90
III.5	Bepflanzung von Retentionsfilterbecken	90
III.6	Inbetriebnahme	92

I Fotodokumentation

I.1 Übersicht der Infiltrationsmuster

Um die Fliessmuster der Tracer hervorzuheben, wurden die Bilder digital aufbereitet. Die Division des Blaukanals durch den Rotkanal eines Fliessmusterbildes entfernt recht zuverlässig Schatten und Effekte ungleichmässiger Beleuchtung (Abb. 1, oval links) und hebt den Farbunterschied zwischen der Bodenfarbe und der Tracerfarbe hervor. Die Invasionszone wird bei dieser Darstellung nicht als Tracer klassiert (Abb. 1, oval rechts), Beschriftungskärtchen oder der Doppelmeter können aber Artefakte hervorrufen. Die horizontalen Linien im Abstand von 10 cm geben einen Anhaltspunkt für die Tiefensickerung. Die Bilder wurden bei Bedarf gedreht, aber nicht systematisch entzerrt.

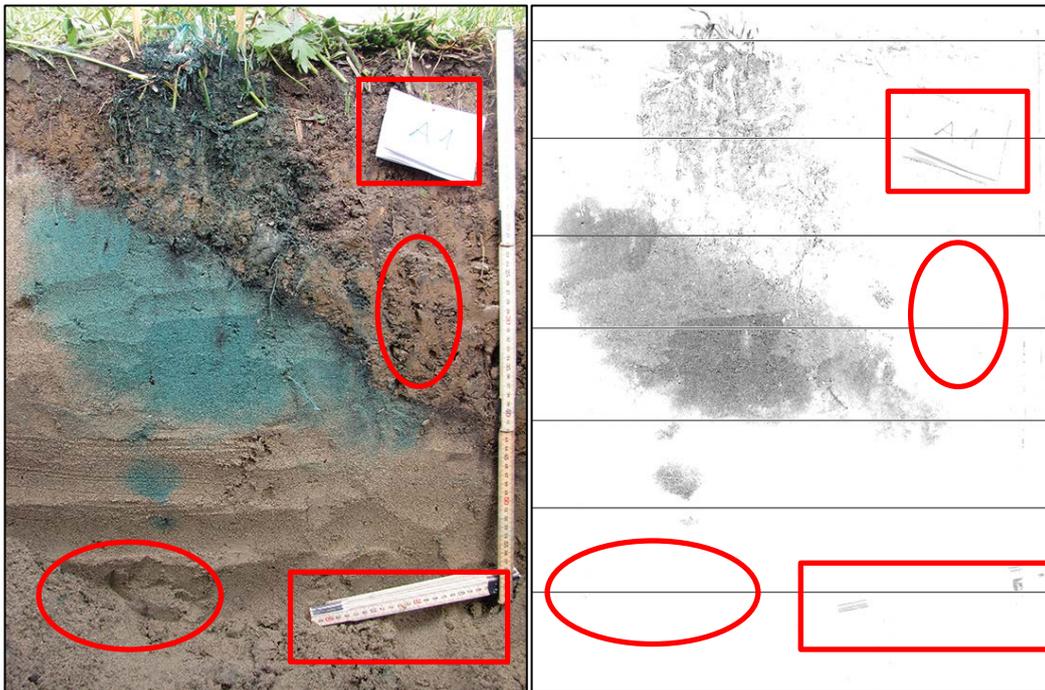


Abb. 1 Fotografie (links) und bearbeitetes Bild (rechts) am Standort Forch 6

In den meisten Fällen zeigen die so aufbereiteten Bilder die Muster des infiltrierenden Wassers klarer als die originalen Fotos. Das Beispiel Buchrain B2 (Abb. 2) zeigt, dass auf 60 cm Tiefe mehr Tracer angekommen ist, als man auf den ersten Blick sieht. In sehr seltenen Fällen, wenn in der Profilgrube z.B. Wasser stand (Ristet A1 und A2) oder wenn ein Hindernis angetroffen wurde (Abb. 3), sind die aufbereiteten Bilder nicht ideal.

Auf den folgenden Seiten sind alle aufgenommenen Fliessmusterbilder abgebildet. Sofern nicht anders vermerkt, bezeichnet A die Stelle nahe beim Zufluss und B die Stelle weiter entfernt vom Zulauf. Die Stellen A und B waren im Allgemeinen ca. 15 m voneinander entfernt und zeigten Unterschiede bezüglich Vegetation, Sedimentauflage und/oder Invasionszone.



Abb. 2 Fotografie (links) und bearbeitetes Bild (rechts) am Standort Buchrain B2

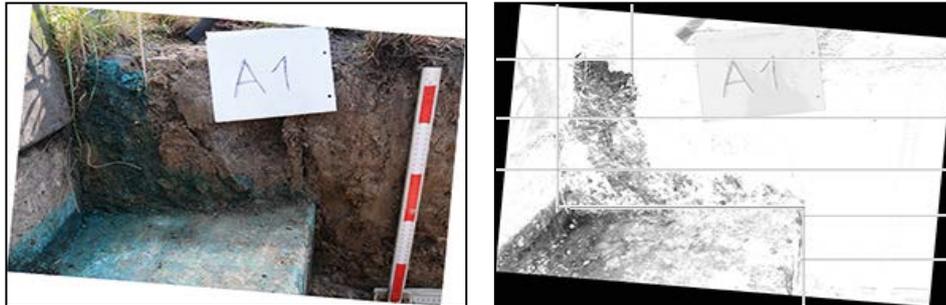
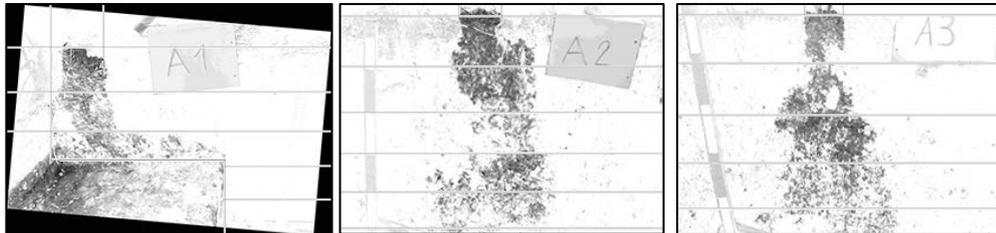


Abb. 3 Fotografie (links) und bearbeitetes Bild (rechts) am Standort Buchrain A1

Buchrain

A

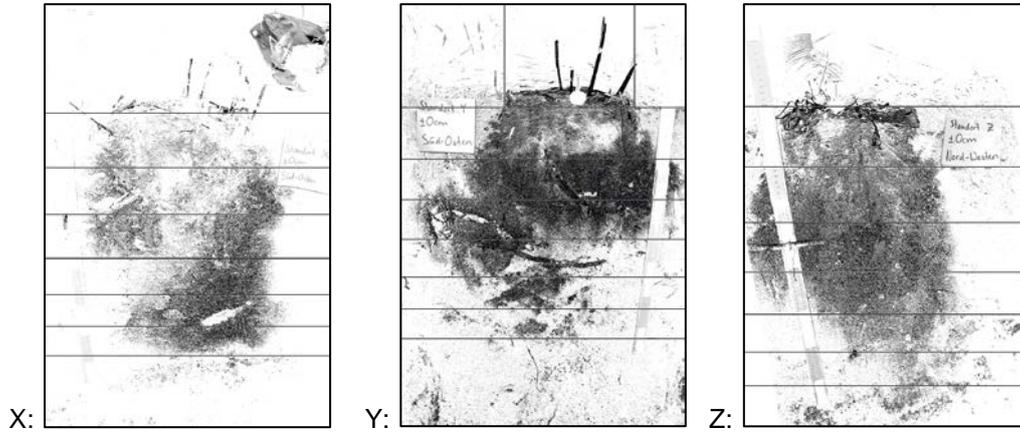


B



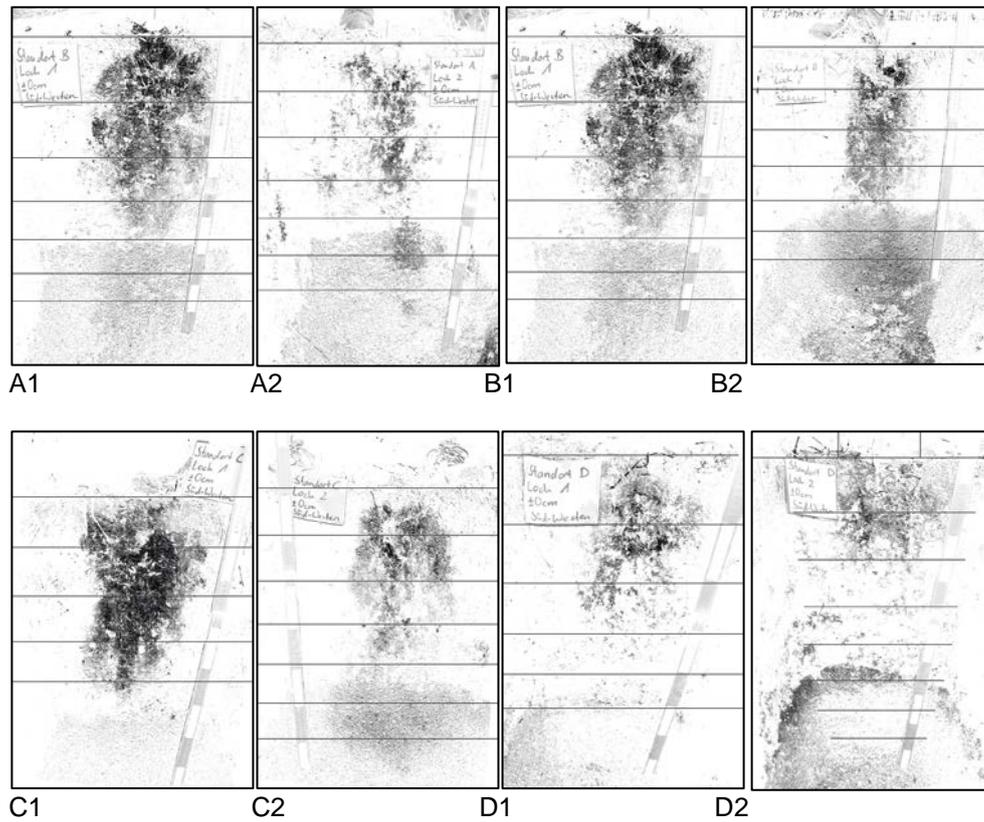
Chlosterschür

Distanz vom Zufluss nimmt von X nach Z ab.



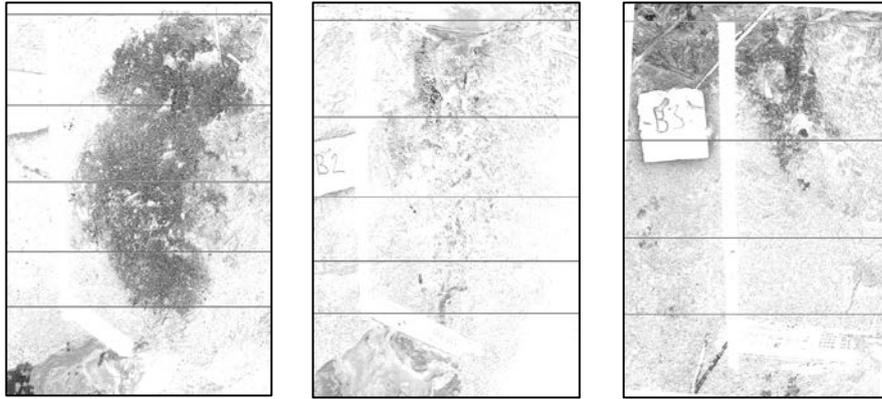
Neuwiesen

Distanz vom Zufluss nimmt von A nach D ab.

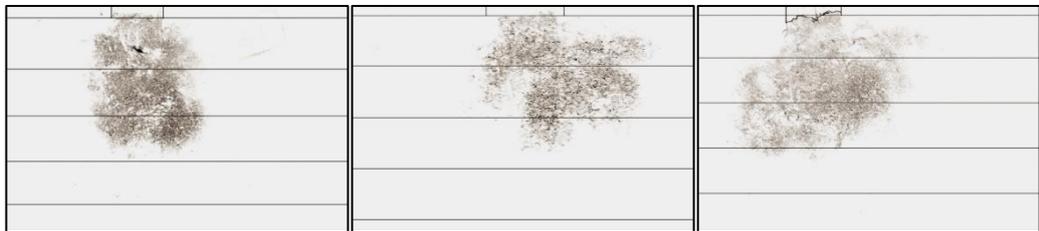


Ristet

A

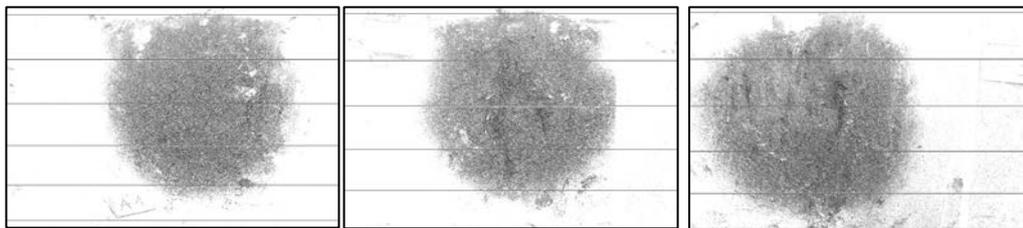


B

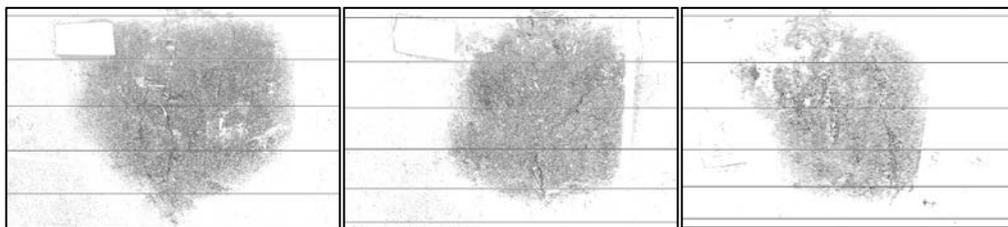


Forch 2

A

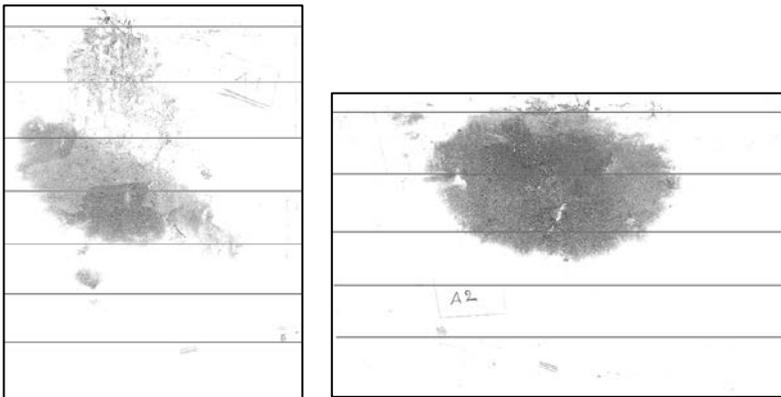


B

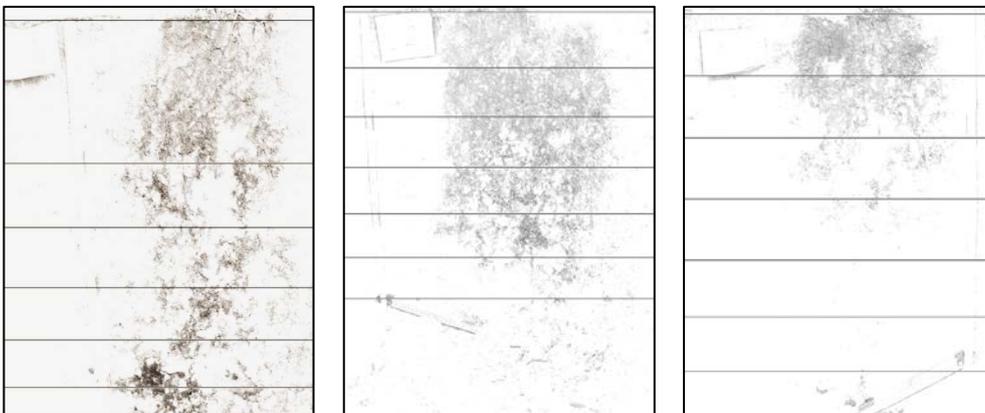


Forch 6

A: Im Bereich des Sandfilters oder im Übergangsbereich

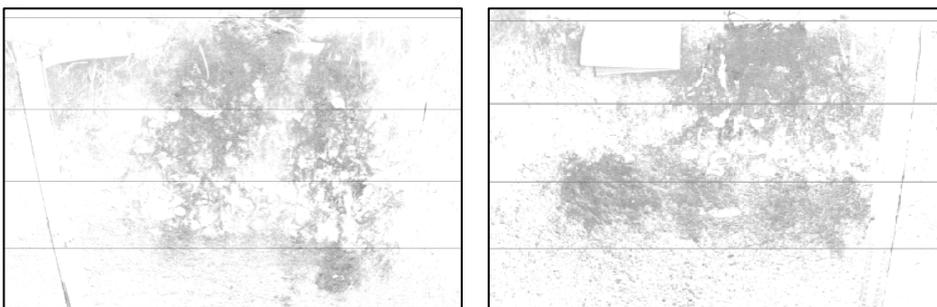


B: im Bereich des Bodenfilters

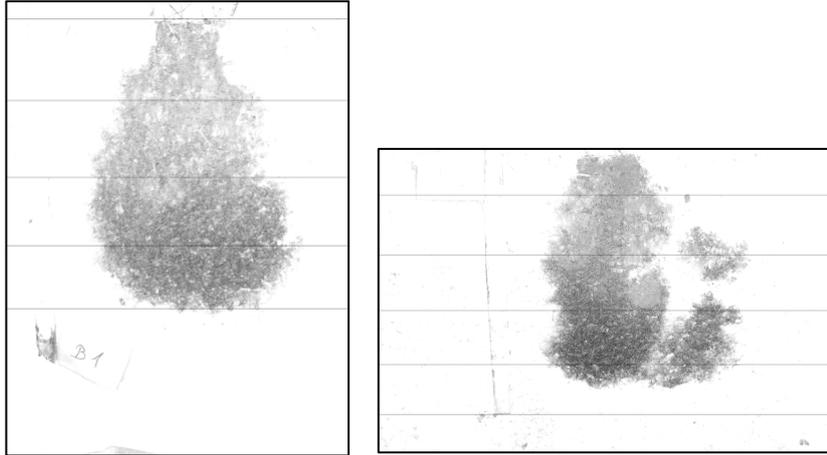


Seltenbach

A

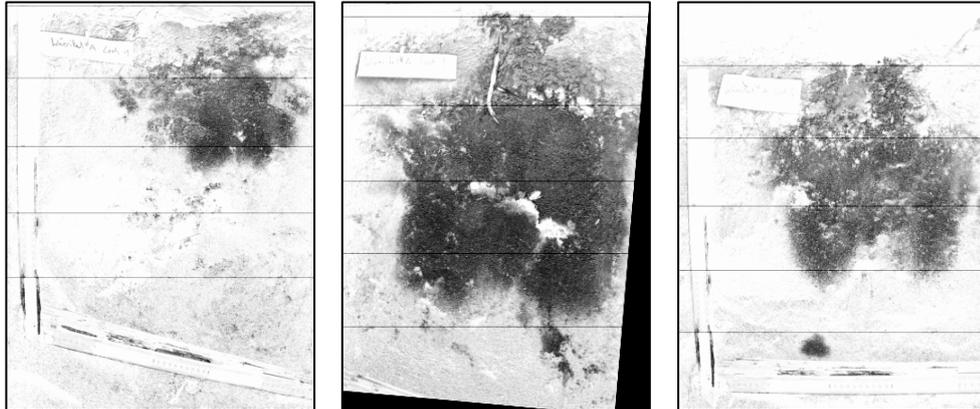


B

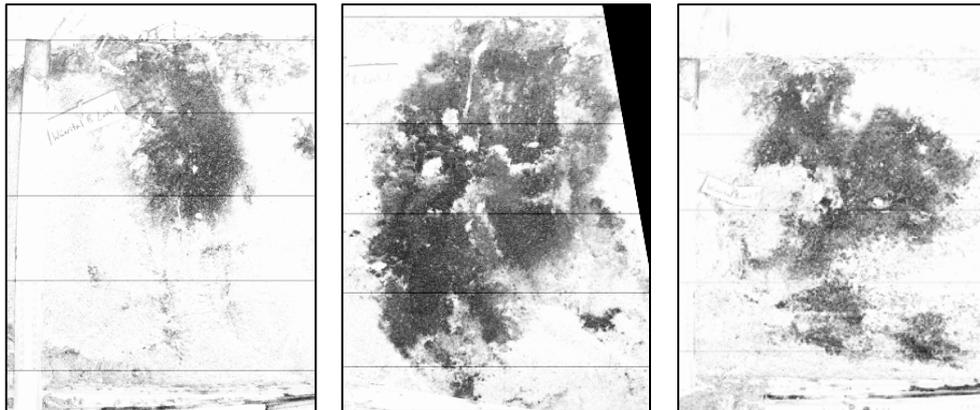


Wüerital

A



B



II Verzeichnis der Anlagen

Die folgenden Auswertungen basieren auf Angaben im SABA Kataster (MISTRA SABA Stand am 7.2.2017 <https://saba.ilu.ch/saba>) [9]

II.1 SABA mit Bodenfiltern

Name	Entwässerte Strassenfläche [ha]	Filterfläche pro Hektare Strassenfläche [m ² /ha]	Fläche ohne Umschwung pro entwässerte Strassenfläche [%]	Investitionskosten Hauptanlage pro entwässerte Strassenfläche [CHF/ha]	in Betrieb seit	Filteraufbau
SABA Münchwilen	3.1	119		87'097	2009	Oberboden und Kies
SABA RFB Bildacker	4.04	126	1.49	123'762	2008	Ober- und Unterboden
SABA Hülften, Füllinsdorf	4.18	132		208'134	2012	Oberboden (3 Schichten)
**SABA Neuwiesen Würenlos	3.79	158	3.17	227'968	2009	Oberboden und Kiessand
*SABA Bissone	2.72	175	1.75	308'824	2012	Ober- und Unterboden
*SABA Hallmatt	9	178		282'222	2009	Ober- und Unterboden
*SABA Selfranga	3.7	189	5.14		2005	Oberboden und Kiessand
SABA Mühlebach Dachsen	2.9	190	5.52		2012	Oberboden und Sand
SABA Ronne Matzingen	4	190	4.5	137'250	2009	Oberboden und Kies
SABA Kleinandelfingen	3.94	203	9.04		2011	Oberboden und Sand
SABA Amsteg	5	206	4.4	140'000	2003	Oberboden und Kiessand
SABA Benken Süd	3.69	217	11.11			Oberboden und Sand
SABA Büel	2.3	217	3.91		2005	Oberboden und Sand
SABA Weierbach	4	220			2012	Oberboden und Sand
*SABA Schaubhus Emmen FBNO	5	240	9		2007	Ober- und Unterboden
SABA Bergmatt Birmensdorf	2	250	4.5	305'000	2007	Ober- und Unterboden
SABA Kessel, Liestal	1.44	250		565'972	2012	Oberboden (3 Schichten)
SABA Rietbach	2.46	252	13.01		2012	Oberboden und Sand
*SABA Ellenwis, Egg	1.85	259	3.73		2011	Ober- und Unterboden
**SABA Seltenbach Humlikon	7.2	264	4.86	125'000	2000	Oberboden und Kiessand
SABA Tüftal, Egg	1.7	271	3.76		2010	Ober- und Unterboden
SABA Thur Nord	4.28	304	10.93		2011	Oberboden und Sand
SABA Allmend Brunau	8.4	333		238'095	2006	Ober- und Unterboden
SABA Bäckental	8.7	402	5.86	229'885	2009	Ober- und Unterboden

Name	Entwässerte Strassenfläche [ha]	Filterfläche pro Hektare Strassenfläche [m ² /ha]	Fläche ohne Umschwung pro entwässerte Strassenfläche [%]	Investitionskosten Hauptanlage pro entwässerte Strassenfläche [CHF/ha]	in Betrieb seit	Filteraufbau
SABA Chüeweid	6.1	443	7.38	245'902	2007	Oberboden und Sand
*SABA AS Buchrain	3.2	469		409'375	2011	Ober- und Unterboden
SABA Bad Ragaz	3.2	475			2013	Ober- und Unterboden
SABA Benken Nord	2.3	522				Oberboden und Sand
*SABA EKZ Zugerland, Steinhausen	1	550			2006	Ober- und Unterboden
SABA Wässerematt	3.35	657	12.54		2009	Ober- und Unterboden
SETEC Grand Ecluse Delémont	1.9	921	20		2005	Oberboden
<i>Median</i>	3.7	250	5.1	229'885		
<i>Mittelwert</i>	3.9	303	6.9	242'299		

* Funktionskontrollen wurden durchgeführt

** Leistungsprüfung wurde durchgeführt

Feld „Investitionskosten“ leer = Angaben unbekannt oder vertraulich

II.2 SABA mit bepflanzten Sandfiltern

Name	Entwässerte Strassenfläche [ha]	Filterfläche pro Hektare Strassenfläche [m ² /ha]	Fläche ohne Umschwung pro entwässerte Strassenfläche [%]	Investitionskosten Hauptanlage pro entwässerte Strassenfläche [CHF/ha]	in Betrieb seit
**SABA Vogelbach, Zumikon	1.7	82	0.85		in Betrieb seit 2013
SABA Bettlenbach, Beckenried	9.68	94		206'612	noch nicht in Betrieb
*SABA Sihlbrugg, Neuheim	1.4	96			umgebaut von Splitt/Kies/Zeolith Sandfilter im Jahre 2012 - Filter
*SABA Wüerital, Birmensdorf	9.2	98	1.63	108'696	in Betrieb seit 2009
SABA Thur Süd, Andelfingen	2.3	109	3.48	195'652	umgebaut von Boden- zu Sandfilter im Jahre 2012
**SABA Chlosterschür, Wettingen	6.9	138	2.17	169'565	in Betrieb seit 2009
SABA Reppisch, Birmensdorf	1.4	143	3.57	178'571	umgebaut von Boden- zu Sandfilter im Jahre 2012
*SABA Dörnliacher, Geuensee	0.69	167			in Betrieb seit 2013
SABA Saarkanal, Sargans	5.6	174		250'000	in Betrieb seit 2013

SABA Wildriet, Mels	6	219		183'333	in Betrieb seit 2013
SABA Verzweigung Sargans	8.08	229		148'515	in Betrieb seit 2013
SABA Faden, Buochs	6.71	252		238'450	noch nicht in Betrieb
**SABA Hostigbach, Egg	1.44	278	4.98		in Betrieb seit 2014
**SABA Chringelbach, Egg	2.3	323	4.60		in Betrieb seit 2014
**SABA Heubergbach, Maur	1.33	323	4.89		in Betrieb seit 2013
**SABA Ristet, Birmensdorf	1.8	389	5.00		in Betrieb seit 2006
SABA Grütwiesen, Zürich					noch nicht in Betrieb
SABA Birchstrasse, Zürich					noch nicht in Betrieb
Median	2.3	170	3.6	183'333	
Mittelwert	4.16	202	3.5	186'599	

* Funktionskontrollen wurden durchgeführt

** Leistungsprüfung wurde durchgeführt

Feld „Investitionskosten“ leer = Angaben unbekannt oder vertraulich

III Hinweise zu Planung bis Inbetriebnahme

Im Folgenden sind einige ergänzende Hinweise zu Dimensionierung, Konstruktion und Bau von RFB mit Boden- und Sandfiltern gegeben, ebenfalls mit Augenmerk auf den Unterschied zwischen Boden- und Sandfiltern. Diese Hinweise beruhen auf unseren Erfahrungen mit Funktionskontrollen ungefähr der letzten sieben Jahre. Wir haben nur die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst. Sie erheben aber nicht den Anspruch von Vollständigkeit und vermögen keinesfalls ein Handbuch für Planung und Bau von SABA zu ersetzen.

III.1 Planung

Flächenbedarf von Anlagen

Bei der Standortwahl und der Ausführung der RFB ist der Schutz der landwirtschaftlich wertvollen Flächen zu berücksichtigen. Der Standort einer Anlage so zu wählen, dass möglichst wenig Kulturland verloren geht. Vor allem sind die sogenannten Fruchtfolgeflächen zu schützen. Man wird also mit Vorteil Verkehrs-Randflächen, Siedlungsbrachen etc. wählen. Falls keine Alternative besteht und die geplante Anlage in Kulturland gebaut werden muss, sollte sie so kompakt wie möglich gebaut werden.

Eine Auswertung von einigen Anlagen zeigt, dass das Verhältnis von Anlagefläche zu Strassenfläche stark variieren kann. Dies zeigt, dass hier noch Optimierungspotential besteht.

Tab. 1 Flächenbedarf von SABA inkl. Umschwung

SABA	Filtertyp	Filterfläche : Strassenfläche	Anlagefläche : Strassenfläche
Wüerital	Sand	1 : 102	1 : 24
Sihlbrugg	Sand	1 : 104	1 : 18
Vogelbach Zumikon	Sand	1 : 122	1 : 13
Bäckental	Ober-/Unterboden	1 : 25	1 : 10
Chüeweid	Ober-/Kiessand	1 : 23	1 : 9
Ristet	Sand	1 : 26	1 : 6
Wässermatt	Ober-/Unterboden	1 : 15	1 : 5

Die Zusammenstellung zeigt, dass neben der Grösse der Filterflächen die Flächen für Zufahrten und Umgebung wesentlich sind. Massgebend für den Flächenbedarf ist immer die gesamte Anlage inkl. Zufahrten.

Filterfläche bei Bodenfiltern

Bei Bodenfiltern ist die Dimensionierung der Filterfläche abhängig von den Eigenschaften des eingesetzten Bodens und somit nicht einheitlich. Da Filter mit bindigen Böden in Deutschland schon seit längerem nicht mehr realisiert werden, stehen für Bodenfilter keine Literaturangaben aus Deutschland zur Verfügung. Unsere Beobachtungen bei in der Schweiz realisierten Bodenfiltern zeigen aber auch, dass viele Bodenfilter überdimensioniert sind.

Filterfläche bei Sandfiltern

- **Erfahrungen mit SABA in der Schweiz:**

Bei den meisten der untersuchten Anlagen entstand der Eindruck, dass die RFB zu gross dimensioniert waren. Bei der SABA Vogelbach, Zumikon (Forch 1) war gemäss unseren Messungen die anfallende Wassermenge rund dreimal so hoch wie projek-

tiert. Die gemessene Reinigungsleistung war trotzdem gut und entsprach den Vorgaben. Auch waren im RFB keine nachteiligen Phänomene wie Kolmation oder Oberflächenerosion zu beobachten. Ebenso konnten wir feststellen, dass die SABA Ristet statt mit zwei Filterbecken auch mit der Hälfte der Filterfläche und nur einem Becken funktionieren würde. Trotzdem sind generell zwei Becken zu empfehlen, damit auch Unterhaltsarbeiten ausgeführt werden können.

Entsprechend wird empfohlen, die Dimensionierung der Filterflächen anzupassen.

- **Angaben in der Literatur:**

Als Faustgrösse für die Behandlung von Strassenabwasser wird in der neuen Auflage des Handbuches für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern von Nordrhein-Westfalen [42] der Wert von 100 m² Filterfläche pro Hektare angeschlossene Strassenfläche vorgeschlagen, sofern die Jahresniederschlagsmenge unter 1 Meter beträgt. Andernfalls sind die Flächen entsprechend zu vergrössern. Unsere Auswertungen zeigen, dass SABA mit bepflanzten Sandfiltern mit rund 100 m² Filterfläche pro Hektare entwässerte Strassenfläche funktionieren, sogar bei Jahresniederschlagsmengen von leicht über 1 Meter.

Ein anderer Ansatz zur Dimensionierung der RFB kommt ebenfalls aus Deutschland. Gemäss Mitteilung des DWA soll das Merkblatt DWA-AM 178 Bemessung und Nachweis um einen Frachtbezug erweitert werden. Als zulässige mittlere Filterflächenbelastung stehen 6-8 kg AFS_{fein}/(m²*a) zur Diskussion. Die Bemessung stützt sich auf die Frachtermittlung anhand des Parameters AFS_{fein}. Gewässerseitige Anforderungen sollen in den Bemessungen und insbesondere in das Nachweisverfahren integrierbar sein.

In den Mitteilungen des DWA [19] werden dieser Ansatz und der Vorteil von zwei getrennten Filterbecken näher erläutert:

„Eine wirkungsvolle Kolmationsvermeidung wird durch regelmäßige und schnelle Abtrocknung der Filteroberfläche erzielt. Ein ständiger Fremdwasserzufluss muss daher konstruktiv unterbunden werden. Alternativ werden zwei Filterbeete, die alternierend beschickt werden können, empfohlen.

Für die Berücksichtigung der Sedimentakkumulation wird in der Ausführung ein „Sedimentstapelraum“ mit einer Höhe von ca. 10 cm bei der Dimensionierung des Retentionsraumes vorgeschlagen.“

Somit ergäbe sich die Filterfläche bei Sandfiltern nicht in erster Linie aufgrund der hydraulischen Leistung, sondern aufgrund der tolerierbaren Menge an Feststoffablagerungen, sodass der Filter nicht kolmatiert. Die hydraulische Leistung ist für das Retentionsvolumen massgebend.

Für genauere Angaben verweisen wir auf das Handbuch für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern von Nordrhein-Westfalen [42] und auf die Publikation in den Mitteilungen des DWA [19]

Retentionsvolumen

Anders als für die Dimensionierung der Filterflächen, stehen für die Dimensionierung der Retentionsvolumen viele bewährte Hilfsmittel zur Verfügung. Die Überprüfung der behandelten und entlasteten Wassermengen im Rahmen der Leistungsprüfungen und Funktionskontrollen zeigte, dass die Vorgaben meist gut eingehalten werden. (z.B. [Bericht SABA 1+2 Forchstrasse, 63 und 63] und [Bericht SABA Chlosterschür und Neuwiesen, 67].

Allerdings sollte bei Strassen mit einem erheblichen Anteil an Böschungsfächen diese bei der Berechnung der anfallenden Wassermengen entsprechend berücksichtigt werden.

Bei der Dimensionierung einer SABA muss auch beurteilt werden, wie viel der anfallenden Regenmenge über die Behandlungsanlage geleitet werden soll. Auch hier sind ver-

schiedene Ansätze möglich. Die Abflüsse können stark schwanken. Eine Entlastung mit der gewünschten Einstellung vor dem Filter ist dem entsprechend sinnvoll bzw. notwendig. [Mitteilung AWEL Kt. Zürich]

Unterbelastung

Unterlast kann die Folge einer falschen Dimensionierung sein, kann aber auch auf Funktionsstörungen vorgeschalteter Verfahrensteile beruhen. Unterlast führt zu schlechter Reinigungsleistung. Die Ursachen können sein: Starker präferenzierter Fluss an Beckenwänden oder anderen Bauteilen, undichten Stellen an den Böschungen oder Auskolkung beim Zulauf, ungenügende Setzung bei Bodenfiltern Ein sicheres Kennzeichen für Unterlast sind Mausgänge und andere Spuren von wühlenden Tieren [Bericht SABA Murg, 71] [Bericht SABA Schutzengel und SABA Schützenmatt, 77].

III.2 Konstruktion

Vorstufen: Absetzbecken und Kiesfilter

In Bayern zeigten die Augsburgische Versuche, dass das Sediment im Strassenabwasser die zentrale Rolle für einen hohen Wirkungsgrad beim Schadstoffrückhalt spielt. Die Entfernung von feinpartikulären Feststoffen durch grosse, vorgeschaltete Absetzstufen verursacht eine enorme Minderung des Stoffrückhalts. Fehlen die Sedimente auf dem Filter, sind dadurch die Voraussetzungen für die sehr leistungsfähige Sedimentfiltration nicht mehr gegeben. [2]

Die Vorstufen sollen vorwiegend auf den Rückhalt von Grobstoffen als unbelüftete Geschiebeschächte ausgelegt werden und damit deutlich kleiner werden [42].

Aus der dargelegten Bedeutung des Sediments für die Filterwirkung der RFB kann man schliessen, dass eine Vorstufe zur Abtrennung des Sediments theoretisch entfallen könnte. Gegenargumente sind der Stapelraum, Ölrückhalt bei Havarie und Unterhalt oder Ausfall des RFB. Dazu existieren ebenfalls verschiedene Untersuchungen von Fuchs, Lambert und Grotehusmann [24].

Die Feststoffe sind demnach in eine grobe (Sand und Kies) und eine feine (Ton und Schluff) Fraktion zu unterteilen, denn beide Fraktionen unterscheiden sich in Bezug auf ihre Schadstoffbeladung. Wichtig ist der wirksame Rückhalt der stark mit Schadstoffen beladenen Feinpartikel. Die grobe, mineralische Fraktion ist dagegen schadstoffarm. Die im RFB ankommenden Feststoffe bestehen vorwiegend aus Feinpartikeln. Konventionelle Absetzanlagen können Feinpartikel nur ungenügend zurückhalten [Fuchs, S. et.al. 2010].

Zusammenfassend kann demnach gesagt werden, dass die Vorstufe wesentlich kleiner als bisher zu dimensionieren ist, damit nur noch die gröbere Sand- und Kiesfraktion zurückgehalten wird und die feineren Partikel auf den Filter gelangen. [25], [42] und [54].

Zulauf und Verteilung des Wassers

Für die gute Funktion des Filters und für einen ausgeglichenen Bewuchs ist eine möglichst gleich-mässige Beschickung des Filters notwendig. Dies kann durch ein günstiges Längen-Breiten-Verhältnis, sowie mit einem geeigneten Verteilsystem erreicht werden.

Die Verteilung des zufließenden Strassenabwassers kann mit einer seitlich angebrachten Rinne oder „mittig“ mit einem auf der Filteroberfläche angebrachten System erfolgen. Dies können ebenfalls Rinnen, oder gelochte Leitungen, oder Halbschalen sein. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen hat sich noch kein System als Standard etabliert, das optimal allen Einwirkungen (Laubeintrag, differentielle Setzungen, Eisbildung) widersteht. Das Verteilsystem muss so ausgelegt werden, dass ein Rückstau im Einlaufbauwerk erst bei gefülltem RFB erfolgt. Je nach System sind somit Entlastungsöffnungen vorzusehen (z.B. bei Verteilleitungen).

Dazu konnten einige Beispiele untersucht werden, wo sich diese zum Teil auch nachträglich eingebaute Art der Verteilung bewährt hat. [Bericht SABA EKZ Zugerland, 68], [Bericht SABA Forch 1 und Forch 2, 62 und 63] [Bericht SABA Forch 3 und Forch 4, 64]

Das Zulaufbauwerk ist so zu gestalten, dass eine Kurzschlussströmung durch Auskolkungen vermieden wird. [Bericht SABA Forch 6, 65]. Als Prallschutz dienende Zementplatten sind so zu verlegen, dass sie nicht unterspült werden können. Ausgespülte Kavernen unter Bauteilen weisen gerne zahlreiche Wühlspuren und Gänge auf, sie sind ein Rückzugsgebiet für Mäuse. Bewährt hat sich das Verlegen von Röhrichtmatten.

Ungleichmässige Verteilung des Wassers bewirkt ungleichmässige Entwicklung der Bodenstruktur und der Vegetation. Dies kann einerseits in der Nähe des Zulaufs frühzeitiges Kolmatieren bewirken, wenn der Filter hier nicht mehr trocken fällt. Andererseits wird der Filter auf der vom Zulauf weiter entfernten Fläche keine geeignete Bodenstruktur oder Sedimentauflage entwickeln und dadurch eine schlechte Reinigungsleistung haben. Zudem können sich unerwünschte Sträucher wie z.B. Brombeeren entwickeln. [Schlussbericht SABA Neuwiesen und Chlosterschür, 67]

Filteraufbau

- **Bodenfilter**

Eine genügende Tiefe der Bodenschicht ist wichtig für die biologische Aktivität, indem sie bei Trockenheit oder Frost ausreichende Rückzugsmöglichkeiten für Bodentiere bietet.

- **Sandfilter**

Die Höhe des eingebauten Sandes soll mindestens 0.50 m betragen. Die Vorgaben für die Korngrößenverteilung und weitere erforderliche Eigenschaften des Sandes sind in Kap. 3.3.3 festgehalten.

Filterkriterien

Bei mehrschichtig aufgebauten Filtern ist unbedingt darauf zu achten, dass die Filterkriterien eingehalten werden und die Kontinuität der Poren gewährleistet ist. Sandwichkonstruktionen mit Schichtaufbau Substrate A / B / A, z.B. bei Zwischenschichten mit Adsorbentmaterialien, neigen zu innerer Kolmation. [SABA Sihlbrugg 2009]

Geotextil

Der Einsatz eines Geotextils zur Trennung von Schichten ist nicht zu empfehlen. Das Geotextil unterbricht die Porenkontinuität, was zu Akkumulation von Feinsediment oder Ausfällung von Eisenoxid und damit zu einer Stauschicht führen kann. [Bericht SABA Schützengel und Schützenmatt, 77]

Fremdwasserweiche

An allen Anlagen mit einem grösseren Fremdwasserzufluss, der nicht abgetrennt wurde, traten immer Probleme auf. Die Filter können zwischen den Niederschlagsereignissen nicht abtrocknen und kolmatieren [Berichte SABA Chlosterschür, 67 und SABA Ristet, 75]. Das Fremdwasser ist daher unbedingt abzutrennen. Mögliche Lösungen sind in Kap. 8.2 festgehalten. SABA eignen sich nicht dazu, die durch Fremdwasser bedingten Probleme eines Entwässerungssystems zu lösen. [42]

III.3 Kurzschlussströmungen, präferenzielle Fließwege

Bei den untersuchten Sandfiltern wurden keine Kurzschlussströmungen oder übermässiger präferenzieller Fluss festgestellt. Diese Probleme treten hauptsächlich bei Bodenfiltern auf.

An feststehenden Bauteilen

Bei mehreren Bodenfiltern war zu beobachten, dass vor allem entlang Beckenwänden, Schächten und anderen feststehenden Bauteilen wie z.B. Zulaufbauwerk besonders starker präferenzieller Fluss auftritt. Da der eingesetzte Boden meist stark zum Quellen und Schrumpfen neigt, bilden sich zwischen den feststehenden Bauteilen und der Bodenmatrix ca. 5 mm breite Spalten, über die das Wasser ungehindert in die Tiefe zur Drainage

geschicht abfliessen kann. Aufgrund dieser Beobachtungen ist davon auszugehen, dass in erster Linie der präferenzielle Fluss beim Zulauf für die schlechte Reinigungsleistung eines Filters verantwortlich sein kann.

Eine einfache Gegenmassnahme ist, die Filteroberfläche im Bereich der Wände wie bei einer Böschung leicht hochzuziehen (Hohlkehle), so dass das Wasser erst nach einiger Zeit, wenn sich wegen der Befeuchtung die Spalte wieder geschlossen hat, die Wand erreicht [Bericht SABA Forch 6, 65] [Bericht SABA Buchrain, 66] und [Bericht SABA EKZ Zugerland, 68].

Bei ungeeigneter Bodenart

Bei ungeeigneten Bodenarten mit hohem Tonanteil und grober Struktur wurde beobachtet, dass die Bodenaggregate vor allem im Unterboden sehr stabil sind und sich der Filter nur sehr langsam setzt. Dies hat zur Folge, dass das Wasser ungereinigt entlang den Aggregatgrenzen abfliessen kann. Dieser Boden hat die hydraulischen Eigenschaften eines Kiesel. [Exkursionsunterlagen SABA Bäckental], [Bericht SABA Reusstal, 73]

Bei ungenügender Setzung des Filtersubstrates

Die im Jahre 2011 durchgeführten Wassermessungen an der SABA Neuwiesen zeigten, dass der Bodenfilter eine unerwartet schlechte Reinigungsleistung und dafür eine sehr hohe Durchlässigkeit aufwies. Als Grund dafür wurde vermutet, dass der Boden immer noch zu locker war und ein grosser Teil des Wassers ungereinigt über präferenzielle Fliesswege versickerte. Es wurde deshalb ein dreimaliger, kontrollierter Einstau durchgeführt mit jeweils genügender Erholungsphase zur Neubildung der Bodenstruktur. Damit wurde erreicht, dass die Setzung des Bodenfilters beschleunigt und damit seine hydraulischen Eigenschaften so verbessert wurden, dass er jetzt gleichmässiger durchströmt wird. Die Reinigungsleistung der SABA Neuwiesen verbesserte sich bei weiteren Messungen markant. Die Analyseresultate zeigen bei den Ablaufkonzentrationen von Kupfer und Zink bei vergleichbaren Zulaufkonzentrationen gegenüber 2011 eine Verbesserung von der tiefsten Leistungsklasse 1 auf die höchsten Leistungsklassen 4 bis 5

Die Werte waren somit vergleichbar mit denjenigen des Sandfilters der SABA Chlosterschür. Der präferenzielle Fluss hat auf ein Mass abgenommen, das ungefähr den natürlichen Verhältnissen im Boden entspricht. [Bericht SABA Neuwiesen, Einstauversuch, 72]

Ein Einstau eines Bodenfilters ist wegen der oben geschilderten Probleme immer von einer Fachperson zu begleiten und zu überwachen. Regelmässige Kontrollen des RFB sind unbedingt notwendig um anaerobe Zonen in der Tiefe und vollständigen Überstau des Filters zu vermeiden. Luftmangel lässt die Pflanzenwurzeln absterben und wirkt sich nachteilig auf die biologische Aktivität und die Bodenstruktur aus, was zum Kolmatieren des Filters führen kann.

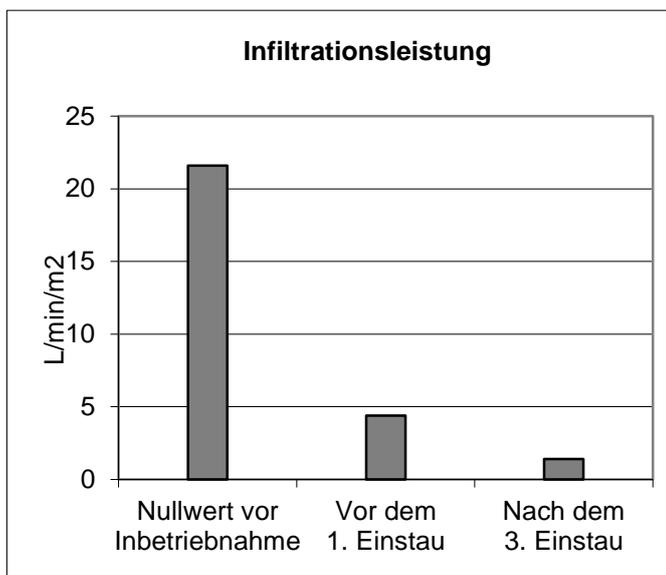


Abb. 4 SABA Neuwiesen, Setzungsversuch

III.4 Bau

Verarbeitung des Bodens bei Bodenfiltern

Grundsätzlich liefern die Richtlinien zum Umgang mit Boden im Tiefbau bzw. auch die Rekultivierungsrichtlinien Hinweise. Ein Bodenfilter ist jedoch keine Rekultivierung, sondern das Kernstück einer technischen Anlage zur Reinigung von Strassenabwasser. Unsere Untersuchungen zeigen, dass Bodenfilter die geforderte Reinigungsleistung zwar erbringen können, hingegen die hydraulischen Eigenschaften oft der kritische Punkt sind. In diesem Sinne sind alle Massnahmen dahingehend zu überprüfen, ob sie allenfalls die Bodenstruktur oder das Porensystem beeinträchtigen könnten. Beim Bau eines Filters ist vor Entnahme des Bodens am Herkunftsort die Bodenstruktur zu beurteilen. Für die Verarbeitung sind Tensiometerwerte > 10 cb zu empfehlen.

Der Einbau des Bodenfilters in die Becken erfolgt mit den üblichen Vorsichtsmassnahmen: kein Befahren, möglichst geringe Fallhöhen, Tensiometerwerte > 10 cb. Da es sich um die kritische Phase in der ganzen Verarbeitungskette handelt, ist hier eine Baubegleitung unbedingt zu empfehlen.

Rückstellproben bei Sandfiltern

Sand ist im Vergleich zu Boden in der Verarbeitung relativ unproblematisch. Bei Sandfiltern sind nach unseren Erfahrungen Qualitätskontrollen und Rückstellproben des einzubauenen Sandes dringend zu empfehlen.

III.5 Bepflanzung von Retentionsfilterbecken

Funktion der Vegetation

Die Pflanzen tragen durch die Durchwurzelung des Filterkörperkörpers und die damit verbundene Verbesserung der hydraulischen Eigenschaften zu einer Optimierung des Gesamtsystems bei. Das abgestorbene Pflanzenmaterial (Streu) bildet über dem Filtersubstrat einen lockeren und sehr porösen Sekundärfilter, der die Substratoberfläche vor Verschlammung und Austrocknung schützt.

Spontanvegetation bei Bodenfiltern

Die Erfahrung hat gezeigt, dass zwischen einer vorübergehenden Erst- oder Startvegetation und einer End- oder Dauervegetation für den Betrieb zu unterscheiden ist. Die Unterscheidung beruht auf folgenden Gegebenheiten: Die Standortbedingungen ändern sich mit der Inbetriebnahme der Anlage. Die verschiedenen Vegetationstypen haben unterschiedliche Anforderungen und Funktionen, die der Stabilisierung des Bodens dienen.

Erfahrungsgemäss stellt sich bei vorgängig landwirtschaftlich genutzten Böden eine Spontanvegetation aus Knöterich (*Polygonum lapathifolium*), Melde (*Chenopodium album*), Amaranth (*Amaranthus retroflexus*), Hühnerhirse (*Echinochloa crus-galli*), Blacke (*Rumex obtusifolium*) und Quecke (*Agropyron repens*) ein. Diese Arten sind vorwiegend tiefwurzeln und vermögen so den Boden ausreichend zu trocknen, zu stabilisieren und eine neue Bodenstruktur zu bilden. Es kann sogar sinnvoll sein, diese Arten zuerst auflaufen zu lassen, um dann erst den Boden zu fräsen und die definitive Saat einzubringen. Verschiedentlich wurde beobachtet, dass die Zielsaat sich nicht entwickeln konnte, solange das Unkrautproblem nicht gelöst war.

Bodenfilter dürfen erst in Betrieb genommen werden, wenn die Filteroberfläche vollständig bewachsen ist.

Grasmischungen, „Öko-SABA Mischungen“

Grasmischungen sind für RFB eigentlich weniger gut geeignet, da Gräser eher flach wurzeln und somit der Unterboden nur ungenügend durchwurzelt wird. Verschiedentlich wurde beobachtet, dass die Anteile an Kräutern, welche in speziell für den Einsatz in RFB entwickelten „Öko-SABA Mischungen“ zugegeben wurden, sich nicht entwickeln konnten. Der Grund dafür liegt vermutlich darin, dass die meisten RFB aus pflanzenphysiologischer Sicht eigentlich Trockenstandorte sind. Für Feuchtstandorte geeignete Arten sind hier nicht konkurrenzfähig und entwickeln sich in der Regel nicht. (Bericht Neuwiesen)

Für eine Ansaat ist der beste Saatzeitpunkt: Mitte April bis Mitte Juni, oder Ende September; nicht im Sommer wegen Hitze und Trockenheit.

Der Boden darf durch die Arbeiten bei Ansaat und Unterhalt nicht verdichtet werden. Er darf also bei Nässe nicht betreten oder befahren werden. Besonders zum Abführen des Schnittgutes ist nach Möglichkeit ein Raupendumper einzusetzen.

Hochstaudenflur

Hochstaudenfluren bestehen aus krautigen (nicht verholzten), hochwüchsigen Pflanzen. Es sind Pflanzengesellschaften, die sich auf feuchten, nährstoffreichen Böden mit einem hohen Grundwasserspiegel entwickeln. Sie blühen meist erst im Spätsommer und bilden in dieser Zeit an offenen Uferabschnitten auffallend bunte und dichte Säume. Soll sich in einem RFB eine Hochstaudenflur entwickeln, muss diese angepflanzt (nicht gesät) werden. Bedingung für die erfolgreiche Entwicklung ist auch eine genügende Wasserversorgung in Trockenzeiten bzw. eine Bodentiefe von mindestens 80 cm. Mit Hochstaudenfluren liegen noch zu wenige Erfahrungen vor. Sie müssen vermutlich nicht regelmässig gemäht werden. Hingegen ist die Entwicklung von Gehölzen zu verhindern (Kanton Uri, Amt für Umweltschutz, Merkblatt 3, Wiesen, Hochstauden und Röhrichte).

Beispiel der SABA Hallmatt:

Die angepflanzte Hochstaudenflur hat sich sehr gut entwickelt, so dass die Bodenoberfläche dicht bedeckt ist. Weiter hat sich eine ca. 2-3 cm starke Streuschicht entwickelt. Diese Streu ist mehrjährig, bereits teilweise zersetzt und in den Boden eingearbeitet. Sie ist durchlässig und schützt die Bodenoberfläche vor Austrocknen und Verschlammung. Die Hochstaudenflur hat sich gut entwickelt, da genügend Wurzelraum und Wasserspeicherkapazität vorhanden sind [Bericht SABA Hallmatt, 69].

Schilf in Bodenfiltern

Bei der Bepflanzung von Bodenfiltern mit Schilf hat sich gezeigt, dass dieses gegenüber Gras unter den gegebenen Standortverhältnissen (Trockenstandort!) wenig konkurrenzfähig ist und sich meist nicht entwickelt. In einigen Fällen konnte zulaufnah an der am stärksten belasteten Stelle ein stabiler Schilfbestand etabliert werden. Dieser kann sich je nach Wasserhaushalt auch noch sehr langsam ausdehnen.

Bepflanzung von Sandfiltern

Sandfilter werden in der Regel mit Schilf bepflanzt, da dieses die Kolmationsgefahr in mehrfacher Weise eindämmt. Die ergänzende Pflanzung mit feuchteliebenden Arten wie Binsen, Seggen, Schwertlilien und Rohrkolben wird allenfalls unter dem Aspekt einer "Biotop-Aufwertung" und / oder an eher schattigen Standorten angewendet.

Schilf (*Phragmites australis*) braucht viel Licht und erträgt wechselnden Wasserstand sehr gut. In der Hauptwachstumsperiode des Schilfrohrs verlängern sich die Rhizome an der Spitze täglich bis zu drei Zentimeter. Die ältesten Rhizomteile sterben jeweils ab (Wurzelkriech- und Verlandungspionier). Schilf ist sehr gut für die Bepflanzung von SABA mit Sandfilter geeignet, da es unempfindlich gegenüber Sedimentablagerungen ist. Die Halme und die Blätter des Schilfes sind durch Verkieselung (Einlagerung von Silicium) starr und verrotten nur langsam. Sie bilden dadurch ein zunächst grobmaschiges, mit zunehmendem Verrottungsgrad feinmaschigeres Schutznetz auf der Filteroberfläche des Retentionsbeckens. Die Streu wächst zu einem "Raumfilter", der erhebliche Oberflächen für eine Sedimentablagerung zur Verfügung stellt.

Die Bepflanzung des Filterbeckens mit Schilf erfolgt idealerweise von April bis Juli oder September bis November mit Setzlingen aus Töpfen mit Rhizomen, in einer Dichte von vier bis acht Pflanzen pro m². Im Einlaufbereich wird so rasch als möglich ein dichter Bewuchs angestrebt. Sehr geeignet ist dazu die Verlegung von vorkultivierten Schilfmatten, ansonsten zumindest eine dichte Pflanzung mit mindestens 8 Pflanzen/m². Die Etablierung des Schilfes hängt stark von den Feuchtbedingungen ab: an nassen Standorten wächst das Schilf rascher; die dauernde Überflutung junger Pflanzen führt jedoch zum Absterben aller überfluteten Blätter. Eine nahezu vollständige Bedeckung erreicht man nach ca. 2-3 Vegetationsperioden. An schattigen Standorten wächst Schilf nicht oder unzureichend.

Einstau und Bewässerung

Nach Abschluss der Pflanzarbeiten ist ein Dauereinstau des Filterbeckens während der Vegetationsperiode von April bis Ende September auf wenige Zentimeter unter der Filteroberkante (1-3 cm) empfohlen. Gleichzeitig unterdrückt der Dauereinstau unerwünschten Unkrautbewuchs auf der Filterfläche. Eine schwallartige Bewässerung wird nach Möglichkeit vermieden, um keine Erosion des Sandfilters bzw. kein Ausschwemmen der Pflanzen zu verursachen.

Quellen

- Retentionsbodenfilter - Handbuch für Planung, Bau und Betrieb, MUNLV Nordrhein-Westfalen, 2003 (erste Auflage) [43]
- Erfahrungswerte [Bericht Chlosterschür und Neuwiesen, 67]

III.6 Inbetriebnahme

Der Zustand von Filter und Vegetation ist wesentlich für das einwandfreie Funktionieren der Anlage. Eine Zustandskontrolle dient der Freigabe für die Inbetriebnahme. Eine allfällige Beeinträchtigung der hydraulischen oder chemischen Leistungsfähigkeit ist in der Regel frühzeitig an einfachen Indikatoren zu erkennen. Somit können geeignete Gegenmassnahmen rechtzeitig einleitet werden.

Für die Inbetriebnahme müssen die Bauarbeiten im Einzugsgebiet abgeschlossen sein und aus unbegrünter Neubaufächen sollen keine hohen Sedimentfrachten mehr zu erwarten sein.

Bodenfilter müssen vollständig bewachsen sein. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Oberfläche verschlämmt und kolmatiert. Die Etablierung einer genügend dichten Vegetation benötigt mindestens eine Saison. Sandfilter können sofort nach der Bepflanzung mit Strassenabwasser beschickt werden. Allenfalls ist ein Teilbetrieb mit reduziertem Wasserzulauf erforderlich bis das Schilf gut angewachsen ist.

Glossar

Begriff	Bedeutung
Abfluss	Wassermenge pro Zeiteinheit
Adsorptionsisotherme	Eine Adsorption kann aus einer Lösung erfolgen. Trägt man in einem Diagramm die Menge des adsorbierten Stoffes (Sorbent) gegen die Konzentration des Stoffes in der Lösung auf, erhält man eine Adsorptionsisotherme. Es besteht keine lineare Beziehung, da mit zunehmender Konzentration des Sorbats die adsorbierte Stoffmenge abnimmt. Mit Hilfe der Adsorptionsisothermen lässt sich das Adsorptionsverhalten verschiedener Bodenkolloide gegenüber Anionen und Kationen, vor allem organischer und anorganischer Schadstoffe, miteinander vergleichen. Diese Aussagen sind für das Filtervermögen des Bodens von Bedeutung.
AFS fein	Abfiltrierbare Stoffe, Feinpartikel <0,063 mm
Boden	Oberste, unversiegelte Erdschicht aus verwitterten mineralischen Stoffen und organischen Bestandteilen, in der Pflanzen wachsen, meist aus Ober- und Unterboden bestehend.
Bodenart	Körnungsklasse
DOC	Dissolved Organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
DTV	Durchschnittlicher Tagesverkehr
EPS	Extrazelluläre Polymere Substanzen; langkettige Verbindungen (Polymere), die von Mikroorganismen gebildet und von diesen in ihre unmittelbare Umgebung abgegeben werden. Die EPS bilden Biofilme. Bakterienarten, die toxischen Substanzen (z. B. Schwermetallen) ausgesetzt sind, verwenden die EPS als Schutzschild. Die toxischen Substanzen werden an die EPS adsorptiv oder adsorptiv gebunden und können damit nicht in das Zellinnere vordringen.
Fruchtfolgeflechte (FFF)	Für die landwirtschaftliche Nutzung besonders gut geeignete, ackerfähiges Kulturland
GUS	Gesamte ungelöste Stoffe (<0.45 µm)
Hochstaudenflur	Hochstaudenfluren sind Pflanzengesellschaften, die sich auf feuchten, nährstoffreichen Böden mit einem hohen Grundwasserspiegel entwickeln. Tiefwurzelnde Kräuter der Hochstaudenfluren festigen die Uferböschung und schützen so vor Ufererosion. Die biegsamen Pflanzen ermöglichen bei Hochwasser einen ungehinderten Wasserabfluss.
Oberboden	Oberste Bodenschicht („Humus“, A-Horizont)
Öko-SABA	Sammelbegriff für Anlagen, die auf einer Filtration mit natürlichem Material (Boden, Sand, Splitt, Kies) basieren und weitgehend ohne Energieeinsatz funktionieren.
Öko-SABA-Mischung	Speziell für RFB entwickelte Straussgrasreiche Saatmischung mit gutem Deckungsgrad; toleriert wechselfeuchte Bedingungen, aber auch zeitweilige Sommertrockenheit. Enthält zum Teil tiefwurzelnde Hochstauden, die mehr oder weniger keinen Schnitt benötigen.
OKT	Oberkante Terrain
OS	Organische Substanz
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
pH-Wert	Mass für den basischen oder sauren Charakter einer Lösung, pH 7 = neutral
Präferenzieller Fluss	Präferenzieller Fluss bzw. Präferenzieller Fliessweg: Örtlicher Sickerweg mit grossem Durchfluss, der die Reinigungswirkung des Filters vermindert.
RBF	Retentionsbodenfilter, in D gebräuchliche Abkürzung, gemeint sind i.d.R. Sandfilter
Retention	Zwischenspeicherung von Strassenabwasser, um einen Vorfluter oder eine Reinigungsanlage hydraulisch nicht zu überlasten
RFB	Retentionsfilterbecken, Anlage, welche der Versickerung oder Einleitung vorgeschaltet ist und eine Rückhalte- und Reinigungsfunktion aufweist
Unterboden	unter dem Oberboden liegende, verwitterte Bodenschicht (B-Horizont)
XRF	Röntgenfluoreszenzanalyse (engl. X-Ray Fluorescence Spectroscopy)

Literaturverzeichnis

-
- [1] Amoozegar A. und A.W. Warrick (1986), Hydraulic conductivity of saturated soils: field methods. In: Klute A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd edition. ASA, Madison, US A. S. 735–770
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008): Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Entwicklungsvorhabens „Versickerung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen“, Augsburg
- [3] BGS/FAL (2002): Klassifikation der Böden der Schweiz,
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie BMVIT, Wien (2011): Gewässerschutz an Strassen, RVS 04.04.11, Forschungsgesellschaft Strasse – Schiene – Verkehr
- [5] Bodenschutzfachstellen (2009), Arbeitshilfe der Bodenschutzfachstellen der Kantone AG, AI, AR, BE, BL, BS, FR, GE, GR, JU, LU, NE, NW, OW, SG, SH, SO, SZ, TG, TI, VD und ZG sowie des Fürstentums Liechtenstein
- [6] Boller, Markus (2002), Charakterisierung von Strassenabwasser - Emissionen und Immissionen, VSA-Fortbildungskurs 2002 – Strassenentwässerung der Zukunft
- [7] Boller, Markus; et. al. (2004), Untersuchung von Filtermaterialien zur Behandlung von Pistenabwasser in Retentionsfilterbecken, Dübendorf, 1. Juni 2004
- [8] Boller, Markus; et. al. (o.D.), Characterization of road runoff and innovative treatment technologies, Dübendorf, Eawag 05124
- [9] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017): MISTRA Management-Informationssystem Strasse und Strassenverkehr (SABA-Kataster), <https://saba.ilu.ch/saba/>, Stand 07.02.2017
- [10] Bundesamt für Strassen ASTRA (2013): Richtlinie Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen, Ausgabe 2013, V1.30
- [11] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016): Funktionsprüfung bei der Abnahme und bei der periodischen Kontrolle, Technisches Merkblatt Bauteil, Entwässerung und Strassenabwasserbehandlung, Fachhandbuch T/U (Trasse/Umwelt) 21 001-10469, V1.00
- [12] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016): Leistungsprüfung neuer Verfahren, Technisches Merkblatt Bauteil, Entwässerung und Strassenabwasserbehandlung, Fachhandbuch T/U 21 001-10468, V1.00
- [13] Bundesamt für Strassen ASTRA (2010): Strassenabwasserbehandlungsverfahren, Stand der Technik, Dokumentation. Steiner, M.; Goosse, P.; Brodmann, R.; Rutz, F.; Pazeller, A., V1.00
- [14] Bundesamt für Umwelt BAFU (2008): Analysenmethoden für Feststoff- und Wasserproben. Richtlinie für die Analysemethoden aus belasteten Standorten und Aushubmaterial. Umwelt-Vollzug Nr. 0812. Bundesamt für Umwelt, Bern. 45 S.
- [15] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (2002): Wegleitung Gewässerschutz bei der Entwässerung von Verkehrswegen, Vollzug Umwelt
- [16] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (2004): Verlagerung gelöster Stoffe durch den Boden ins Grundwasser; BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 349, Gewässerschutz
- [17] Christ, Alexandra (2004): Zum Transport von partikelgebundenen Schadstoffen in der ungesättigten Zone, Diss. Mainz
- [18] DWA (2010): Strassenentwässerung, Seminarunterlagen, Fürth
- [19] DWA (2014), KA, Korrespondenz Abwasser – Abfall
- [20] DWA-A 262 (2006): Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzen Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers, DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- [21] DWA-Landesverband Bayern (2009): Informationsveranstaltung in Monheim/Alb D, Bilanz eines Verfahrens zur Regenwasserbehandlung, München
- [22] DWA-M 178 (2005): Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft e.V., DWA-Regelwerk, Merkblatt
- [23] Flury, M. und H. Flüher (1995): Tracer characteristics of brilliant blue FCF, Soil science society of america journal. 59 (1), 22-27
- [24] Fuchs, S.; Lambert, B; Grothmann, D. (2010): Neue Aspekte in der Behandlung von Siedlungsabflüssen, Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung, Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Nr. 6
- [25] Grothmann / DWA (2010): Strassenentwässerung, Seminarunterlagen, Fürth
- [26] Gupta, P. et al. (2016): Bacterial Exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A Review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies, Elsevier Biotechnology Reports 2017, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5361134/>
-

-
- [27] Hahn, M. et. al. (2000): Literaturstudie zum Thema Darstellung und Bewertung des Wissensstandes zum Schadstoffabbau und –transport in natürlichen Böden; Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt, Heft 4, Hrsg: Lehrstuhl Wassertechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
-
- [28] Hermann, F. (2010): Dicke Filter mit grossen Löchern – Numerische Simulation von Raumfiltern, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) Zürich
-
- [29] Kanton Uri: Merkblatt 3, Wiesen, Hochstauden und Röhrichte; Amt für Umweltschutz, Klausenstrasse 4, 6460 Altdorf
-
- [30] Kanton Zürich Baudirektion (2014), Tiefbauamt und Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Gewässerschutz an Strassen, Teil 1a, Strategie für die Strassenentwässerung sowie Anleitung zur Wahl des Strassenentwässerungssystems
-
- [31] Kanton Zürich Baudirektion (2014), Tiefbauamt und Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Gewässerschutz an Strassen, Teil 1b, Strategiebericht
-
- [32] Kanton Zürich Baudirektion (2014), Tiefbauamt und Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Gewässerschutz an Strassen, Teil 1c, Grundlagen für die Zulässigkeitsprüfung der Einleitung in Oberflächengewässer
-
- [33] Kanton Zürich Baudirektion (2014), Tiefbauamt und Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Gewässerschutz an Strassen, Teil 2, Richtlinie Projektierung und Ausführung von Gewässerschutzmassnahmen
-
- [34] Kanton Zürich Baudirektion (2014), Tiefbauamt und Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Gewässerschutz an Strassen, Teil 3, Handlungsbedarf aufgrund des Gewässerschutzes
-
- [35] Kasting, U. (2002): Reinigungsleistung von zentralen Anlagen zur Behandlung von Abflüssen stark befahrener Strassen, Diss. Universität Kaiserslautern
-
- [36] Koch, R. et al. (2002): Erarbeitung einer Methodik zur Bestimmung der Eigenschaften und Leistungsfähigkeit von natürlichen Böden für die Behandlung schwach belasteter Abwässer; Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt, Heft 6, Hrsg: Lehrstuhl Wassertechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
-
- [37] Kocher, B. (2016): Behandlung von Strassenabwasser, Bundesanstalt für Strassenwesen bast, Bergisch Gladbach, in: Tagungsunterlagen Erfahrungsaustausch SABA – ASTRA, Luzern
-
- [38] Kulli B., M. Gysi und H. Flühler (2003): Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. *Soil & Tillage Research*, 70 (1), 29-40
-
- [39] Kutschera, L., et.al. (1997): Die Bewurzelung von Pflanzen in den verschiedenen Lebensräumen, 5. Band der Wurzelatlas-Reihe, Klagenfurt
-
- [40] Lambert, B. (2009): Langzeitverhalten von Retentionsbodenfiltern, in: Tagungsband 20 Jahre Retentionsbodenfilter, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall DWA
-
- [41] Lebensministerium, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2013): Entwicklung von Methoden zur Prüfung der Eignung von Substraten für die Oberflächenwasserbehandlung von Dach- und Verkehrsflächen, Langfassung, Wien
-
- [42] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen MKULNV (2015): Retentionsbodenfilter Handbuch für Planung, Bau und Betrieb; aktualisierte 2. Auflage
-
- [43] Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen MUNLV (2003): Retentionsbodenfilter Handbuch für Planung Bau und Betrieb, 1. Aufl. (Uhl, M., et. al)
-
- [44] Scheffer, F.: (Scheffer/Schachtschabel) (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Aufl.
-
- [45] Stamm, C., H. Flühler, R. Gächter, J. Leuenberger und H. Wunderli (1998): Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *Journal of Environmental Quality*, 27 (3), 515-522
-
- [46] Steiner, M. (2003): Adsorption von Kupfer aus Niederschlagsabflüssen an granuliertes Eisenhydroxid, DISS. ETH Nr. 14878
-
- [47] Stumm, W. / Morgan J.J. (1981): *Aquatic Chemistry*; 2nd Ed.
-
- [48] Verordnung über Belastungen des Bodens VBBo (1998), SR 814.12
-
- [49] Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA (2008), Regenwasserentsorgung, Richtlinie zur Versickerung, Retention und Ableitung von Niederschlagswasser in Siedlungsgebieten, Nov. 2002, Update 2008
-
- [50] Waldhof, A. (2008): Hygienisierung von Mischwasser in Retentionsbodenfiltern (RBF), Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Band 30, Universität Kassel
-
- [51] Wasser Technologie Portal (2017): Abwasserlexikon, <http://www.wasserwissen.de/abwasserlexikon/e/eps.htm>
-
- [52] Weiler M. und Naef F. (2003): An Experimental Tracer Study of the Role of Macropores in Infiltration in Grassland Soils. *Hydrological Processes*: 17(2), 477-493.
-
- [53] Dekker, L.W. and C.J. Ritsema (1994): How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30(9), 2507-2517
-

- [54] Eyckmanns-Wolters, R. et. al. (2013): Characterization of particles in urban stormwater runoff, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Water and River Basin Management, Department of Aquatic Environmental Engineering, Karlsruhe,
- [55] FAL (1997): Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz
- [56] Flühler, H., W. Durner and M. Flury (1996): Lateral solute mixing processes - A key for understanding field-scale transport of water and solutes. *Geoderma*, 70(1-4), 165-183
- [57] Hagendorf U., et al. (2003): Bewachsene Bodenfilter als Verfahren der Biotechnologie, Texte 05/03, Umweltbundesamt, Berlin
- [58] Reynolds, W.D. and D.E. Elrick (2002): Constant head well permeameter (Vadose zone). In: J.H. DANE and G.C. TOPP, eds, *Methods of soil analysis, part 4, physical methods*. 2 edn. Madison, USA: Soil Science Society of America, pp. 844-858
- [59] Ritsema, C.J. and L.W. Dekker (1994): How water moves in a water repellent sandy soil: 2. Dynamics of fingered flow. *Water Resources Research*, 30(9), 2519-2531
- [61] Steiner, M.; Langbein, St.; Boller, M. (-), Bankette bestehender Strassen, Untersuchung der Versickerung von Strassenabwasser über Randstreifen an einer bestehenden Strasse, (Bericht Burgdorf)

Berichte zu Funktionskontrollen (unveröffentlicht)

- [62] SABA 1, Vogelbach, Funktionskontrollen SABA, K52, Forchstrasse, Schlussbericht, ilu AG, GEOTEST AG, wst21 (2016)
- [63] SABA 2, Heubergbach, Funktionskontrollen SABA, K52, Forchstrasse, Schlussbericht, ilu AG, GEOTEST AG, wst21 (2016)
- [64] SABA 3, Chringelbach und SABA 4, Hostigbach, K52, Forchstrasse, Funktionskontrolle, Untersuchung der Sandfilter, GEOTEST AG, (2016)
- [65] SABA 6, Forchstrasse, Schadensermittlung, Bericht, GEOTEST AG, (2015)
- [66] SABA Buchrain LU, A14 Reussbrücke – Anschluss Buchrain, Untersuchung des Bodenfilters, GEOTEST AG (2015)
- [67] SABA Chlosterschür und Neuwiesen, N01/05 Baden – Spreitenbach, Leistungsprüfungen und Funktionskontrollen, Gesamtbericht, ilu AG, GEOTEST AG, wst21, Minikus Vogt & Partner AG, (2016)
- [68] SABA Einkaufszentrum Zugerland, Funktionskontrollen, Gesamtbericht, ilu AG und Agrarökologie Pazeller (2012)
- [69] SABA Hallmatt, Zustandskontrolle des Bodenfilters, Bericht, Pazeller, A. (2013)
- [70] SABA Miniautobahn, N4.2 Andelfingen - Flurlingen „Miniautobahn“, Strassenabwasser-Behandlungsanlagen SABA, Schlussbericht der Fachbaubegleitung, Pazeller, A. (2012)
- [71] SABA Murg, Sirmach, Beurteilung der Durchlässigkeit des Bodenfilters, Bericht, GEOTEST AG (2017),
- [72] SABA Neuwiesen, N1/05, Zustandskontrolle Phase 3 mit Einstauversuch, Schlussbericht, Pazeller, A. (2012)
- [73] SABA Reusstal, AS Buchrain, Zustandskontrolle der Bodenfilter, AN 23.05.2017, GEOTEST AG (2017)
- [74] SABA Reusstal, Funktionsprüfung Schlussbericht, wst21, Steiner M. und Goosse P. (3.2.2017)
- [75] SABA Ristet, Waldeggstrasse, Strassenabwasserbehandlungsanlage Gesamtbericht über die Erfolgskontrollen 2007/8 und die Funktionskontrollen 2015/16, ilu AG, GEOTEST AG, AquaPlus, wst21, (2016)
- [76] SABA Sargans, A3 / A13 Trübbach – Bad Ragaz, Bodenbelastung entlang der Autobahn in Abhängigkeit der bisherigen Entwässerungsart - Bestandsaufnahme inkl. Empfehlungen für Massnahmen im Zusammenhang mit der Sanierung der Autobahn; interner Bericht, Kanton St. Gallen, Amt für Umweltschutz (2006)
- [77] SABA Schützengel und Schützenmatt, Zustandskontrolle 2013, Bodenkundliche Untersuchung der Retentionsfilterbecken, Bericht, Pazeller, A. (2014),
- [78] SABA Seltenbach, Humlikon ZH, Vereinfachte Leistungsprüfung, SABA Anlagen der ASTRA Filiale Winterthur F4, Leistungs- und Funktionskontrollen, Fachmandat Filteruntersuchung, Bericht, GEOTEST AG (2017)
- [79] SABA Wüerital, Birmensdorf ZH, Leistungsprüfung, SABA Anlagen der ASTRA Filiale Winterthur F4, Leistungs- und Funktionskontrollen, Fachmandat Filteruntersuchung, GEOTEST AG (2017)
- [80] Strassenabwasserbehandlung, Boden-, Sand- und Kiesfilter, Dokumentation der Erfahrungen, ilu AG, (2014)

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 23.08.2017

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2011/204

Projekttitel: Vergleich der Eignung von bewachsenen Boden- und Sandfiltern zur Feinigung von Strassenabwasser

Enddatum:

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ziel der Arbeiten war, Boden- und Sandfilter in ihrer hydraulischen Leistung, Reinigungsleistung sowie den Kosten zu vergleichen. Dazu wurden die Ergebnisse von Funktionskontrollen an 20 Anlagen ausgewertet. Für die Auswertung der Investitions- und Betriebskosten standen die Angaben von 49 Anlagen zur Verfügung.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Partikel aus dem Strassenabwasser mit den adsorbierten Schadstoffen in Boden- und Sandfiltern zurückgehalten werden. Im Vergleich zum Boden zeigte der Sand jedoch eine bessere Filterwirkung, indem der weitaus grösste Teil der Partikel entweder in einer Sedimentauflage an der Oberfläche oder in den obersten cm der Sandschicht zurückgehalten wird. Versuche mit einem Farbtracer ergaben, dass im Bodenfilter die Stoffe durch präferenziellen Fluss im Vergleich zum Sandfilter schneller und in grössere Tiefen verlagert werden. Die mechanische Filterung ist im Sand effektiver als im Boden. Auch die Möglichkeit der Adsorption gelöster Stoffe an Tonminerale in Bodenfiltern bietet keine zusätzlichen Vorteile.

Der spezifische hydraulische Durchfluss von Sandfiltern ist im Vergleich zu Bodenfiltern im Mittel um das Vierfache höher. Sandfilter haben demnach eine deutlich höhere hydraulische Leistung und beanspruchen daher auch weniger Fläche als Bodenfilter.

Die Ablaufkonzentrationen von GUS und Kupfer sind bei Boden- und Sandfiltern ungefähr gleich, während sie für Zink bei Sandfiltern um mindestens eine Leistungsklasse besser als bei Bodenfiltern sind. Sandfilter zeigen somit eine mindestens gleich hohe und zudem stabilere Schadstoffentfernung als Bodenfilter, und dies trotz höherer hydraulischer Leistung.

Die Auswertung von Daten aus dem SABA Kataster (MISTRA SABA) ergaben, dass die Investitionskosten bei Anlagen mit Sandfiltern im Mittel geringer sind gegenüber Anlagen mit Bodenfiltern. Im Unterhalt sind Sandfilter wesentlich einfacher und damit auch günstiger als Bodenfilter.

Forschung im Strassenwesen des UVEK; Formular 3

Seite 1 / 3



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das wesentliche Ziel des Forschungsprojektes wurde erreicht, indem die Unterschiede zwischen Boden- und Sandfiltern herausgearbeitet werden konnten. Damit ist es möglich, beide Filtertypen hinsichtlich hydraulischer Leistung, Reinigungsleistung sowie Investitions- und Unterhaltskosten zu bewerten.

Folgerungen und Empfehlungen:

Sandfilter sind den Bodenfiltern vorzuziehen. Sie weisen eine mindestens gleich hohe Reinigungsleistung wie Bodenfilter auf, und das bei besserer hydraulischer Leistung. Sie sind günstiger im Bau und einfacher im Unterhalt.

Die Erkenntnisse können in den Richtlinien und in der SN 640 361 Strassenentwässerung, Behandlungsanlagen berücksichtigt werden.

Publikationen:

Zwischenergebnisse wurden bereits an mehreren Anlässen vorgestellt: VSS-Tagungen zum Thema Strassenabwasserreinigung, Erfahrungsaustausch der ASTRA-SABA-Gruppe sowie zahlreichen Begehungen von Anlagen mit Vertretern des ASTRA und kantonaler Behörden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes haben auch zwei Studierende eine Bachelorarbeit verfasst.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Pazeller

Vorname: Adalbert

Amt, Firma, Institut: GEOTEST AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Der Forschungsbericht gibt einen Überblick über bisherige Forschungsergebnisse und ergänzt dies mit eigenen Untersuchungen. Die Vor- und Nachteile der beiden SABA-Typen Boden- und Sandfilter werden gut herausgearbeitet, obschon einzelne Details und Widersprüche noch nicht abschliessend geklärt sind. Der Bericht enthält praxisbezogene Informationen, die für die Projektierung und deren Umsetzung sehr hilfreich sind. Er vereinfacht die Systemwahl für künftige Projekte und wird für die Zukunft der Strassenabwasserbehandlung von grosser Bedeutung sein. Das Ziel des Projekts wurde erreicht.

Umsetzung:

Aufgrund der klaren Sachlage soll der Bau von SABA mit Bodenfiltern künftig die Ausnahme sein. Dadurch kann der Flächenbedarf für SABA markant reduziert werden. Die klaren Hinweise, dass künstlich geschüttete Böden zu präferenziellem Fluss und schlechterer Reinigungsleistung führen, muss ebenfalls bei anderen Entwässerungstypen berücksichtigt werden, so bei der Entwässerung über die Schulter und bei Mulden-Rigolen-Systemen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Schlechte Reinigungsleistung geschütteter Böden bei der Entwässerung über die Schulter, Auswertung von grossen Anlagen mit Einzugsgebieten >10ha, Massenbilanzen der Feststoffe bei Sandfiltern mit Absetzbecken

Einfluss auf Normenwerk:

Anzupassen sind: ASTRA-Richtlinie Strassenabwasser an Nationalstrassen, VSA-Richtlinie Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter und VSS Norm 640 361 Strassenentwässerung, Behandlungsanlagen

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Schulin

Vorname: Rainer

Amt, Firma, Institut: Inst. f. Terrestrische Oekosysteme, ETH Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Rainer Schulin

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (Forschung im Strassenwesen → Downloads → Formulare) heruntergeladen werden.